

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO - FEC

**COMPORTAMENTO TÉRMICO DE
COBERTURAS DE FIBROCIMENTO EM
CAMPINAS, SP: APLICAÇÃO DE TÉCNICAS
PASSIVAS.**

CARLA FERNANDA BARBOSA TEIXEIRA

Campinas

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO
DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO

COMPORTAMENTO TÉRMICO DE COBERTURAS DE FIBROCIMENTO EM CAMPINAS, SP: APLICAÇÃO DE TÉCNICAS PASSIVAS.

CARLA FERNANDA BARBOSA TEIXEIRA

Orientadora: Prof^a Dr^a LUCILA CHEBEL LABAKI

Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo da UNICAMP para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil do
programa de Pós-graduação com
concentração na área de Edificações.

Campinas, SP
Julho, 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

T235c Teixeira, Carla Fernanda Barbosa
Comportamento térmico de coberturas de
fibrocimento em Campinas, SP: aplicação de técnicas
passivas / Carla Fernanda Barbosa Teixeira.--Campinas,
SP: [s.n.], 2006.

Orientador: Lucila Chebel Labaki
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

1. Arquitetura e clima. 2. Cobertura (engenharia). 3.
Conforto térmico. 4. Bioclimatologia. I. Labaki, Lucila
Chebel. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo. III. Título.

Titulo em Inglês: Thermal behavior of fiber-cement roofing in Campinas – SP:
application of passive cooling

Palavras-chave em Inglês: Bioclimatic architecture, Evaporative cooling,
Reflective and radiant cooling, Roofing,
Composite climate, Thermal comfort

Área de concentração: Edificações

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Carolina Lotufo Bueno-Bartholomei, João Roberto
Gomes de Faria, Rosana Maria Caram de Assis


Data da defesa: 28/07/2006

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

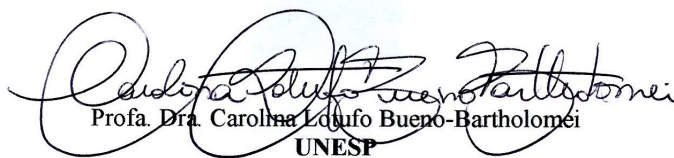
**COMPORTAMENTO TÉRMICO DE COBERTURAS DE FIBROCIMENTO
EM CAMPINAS, SP: APLICAÇÃO DE TÉCNICAS PASSIVAS.**

Carla Fernanda Barbosa Teixeira

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki
Presidente e Orientadora/FEC-UNICAMP



Profa. Dra. Carolina Ldufo Bueno-Bartholomei
UNESP



Profa. Dra. Rosana Maria Caran de Assis
FEC-UNICAMP



Prof. Dr. João Roberto Gomes de Faria
UNESP

Campinas, 28 de julho de 2006

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, Ademir.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria o mesmo se não tivesse contado com o carinho e a cooperação dos muitos amigos que conquistei nesta vida, em especial:

À Profa. Dra. Rosío Fernandez Baca Salcedo, orientadora de minha graduação na Unesp, pelo incentivo e colaboração quando resolvi iniciar a carreira acadêmica;

À Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki por confiar em mim sua orientação;

Ao Arq. Sérgio Tavares da Vacuoflex, empresa instalada no Campo Tecnológico da Unicamp, por ceder gentilmente o filme de alumínio adesivado;

Aos Tecg. Obadias Pererira da Silva Junior e Tec. Daniel Celente, do Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada - LACAF, pelo auxílio técnico e paciência na montagem e manutenção dos equipamentos;

Ao Msc Eduardo Jacob Lopes pela assessoria no tratamento estatístico;

Aos amigos que conquistei no programa da pós-graduação pelos auxílios e opiniões em assuntos técnicos, além do apoio moral;

Ao meu querido pai, Ademir, pelas horas de trabalho em conjunto, sob sol e chuva, nas coberturas das células-teste;

À toda minha família que torceu para o sucesso desta pesquisa, em especial, a minha irmã, Michelle, ao meu tio, Amarildo, e as minhas avós, Ana e Francisca;

E à Deus, pois sem sua permissão, não galgaria mais este degrau em meu aperfeiçoamento.

RESUMO

O Brasil possui a maior parte de suas terras em clima tropical. Sendo a cobertura o elemento construtivo mais exposto à radiação solar direta, torna-se um desafio aos pesquisadores e projetistas, atenuar as temperaturas nas coberturas das edificações e contribuir para o uso racional de energia. O objetivo desta pesquisa é monitorar o desempenho térmico de coberturas de fibrocimento em células-teste na cidade de Campinas, SP, com aplicação de técnicas passivas de resfriamento. Utilizaram-se quatro células-teste: uma célula-teste de referência, e outras três com os sistemas: evaporativo, radiante e reflexivo, respectivamente, e monitoramento das temperaturas superficiais internas das telhas (TT`s) e temperaturas do ar dos áticos (TAA`s), no período de 21 de janeiro a 9 de fevereiro de 2006. Para o sistema de resfriamento evaporativo foram utilizados ciclos de aspersão com diferentes intervalos no período todo. Entre as técnicas monitoradas, o melhor comportamento térmico foi verificado no 2º período (de 26 a 30/jan com aspersão contínua) na temperatura da superfície interna da telha do sistema evaporativo ($TT_{evap} = 23,2^{\circ}\text{C}$) apresentando um decréscimo de $1,3^{\circ}\text{C}$ em relação a célula-teste de referência e um acréscimo de $0,1^{\circ}\text{C}$ em relação as médias da temperatura do ar para o período. Nas médias da temperatura do ar dos áticos, o 2º período apresentou os menores valores para os sistemas: reflexivo ($TAA_{refl} = 23,4^{\circ}\text{C}$) e evaporativo ($TAA_{evap} = 23,5^{\circ}\text{C}$), apresentando uma atenuação de $0,5^{\circ}\text{C}$ e $0,4^{\circ}\text{C}$ em relação a célula de referência respectivamente, além de uma elevação de $0,3^{\circ}\text{C}$ em relação as médias da temperatura do ar externo. Os resultados, analisados através de tratamento estatístico, demonstram a viabilidade do uso do sistema evaporativo em condições climáticas de elevada umidade relativa do ar, contribuindo para atenuar os efeitos das hostilidades climáticas em coberturas das edificações.

ABSTRACT

In Brazil, the tropical climate is predominant in most of regions. Roofing is the building component with the highest exposition to direct solar radiation. The challenge for researchers and designers is to achieve comfort in the built environment and to contribute to energy saving, proposing roofing systems with good thermal insulation, and consequently lesser internal surface temperatures. The objective of this research is to monitor the thermal behavior of fiber-cement roofing and to present a discussion about the results obtained in cell-tests in the city of Campinas, SP, through passive cooling techniques. Four cell-tests were used: one cell-test was adopted as reference, and the other three were analyzed with evaporative, radiative and reflective systems, respectively. The evaporative system was tested with different aspersion cycles through spraying systems and intervals. The monitored parameters were the internal surface temperatures of the roofing tiles (TT`s) and attic air temperatures (TAA`s) in the period of January 21st to February 9th of 2006. Among the monitored passive techniques, the best thermal behavior was observed in the 2nd period (from January 26th to 30th, corresponding to continue spraying), related to the internal surface temperature with the evaporative system (TTevap = 23,2°C). A reduction of 1,3°C was observed, as compared to the reference test-cell and an increase of 0,1°C in comparison with the average air temperature. In relation to the average of attic air temperature, the 2nd period presented the lowest temperature for reflexive system (TAArefl = 23,4°C) and evaporative system (TAAevap = 23,5°C); a reduction of 0,5°C and 0,4°C in relation of the reference test-cell respectively was observed; also, it showed an increase of 0,3°C as compared with air temperature. The results presented through statistical analyses demonstrated that the use of the evaporative system in climatic conditions with high relative humidity is viable, contributing, therefore, to attenuate the effects of climatic hostilities in the roofing buildings.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 CONFORTO TÉRMICO	20
3.1.1 Trocas de Calor: Ambiente e Materiais	20
3.1.2 Trocas de Calor: Homem e Ambiente	21
3.2 ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA	23
3.2.1 Bioclimatologia	23
3.2.2 Carta Bioclimática	25
3.2.3 Tratamento Climático e Recomendações de Projeto	29
3.2.4 Zoneamento Bioclimático Brasileiro	29
3.3. RESFRIAMENTO PASSIVO	35
3.3.1. Resfriamento Evaporativo	35
3.3.1.1 Estratificação Térmica na Cobertura Através de Tanques, Bolsas ou Colchões d'Água	38
3.3.1.2 Aspersão d'água na Cobertura	41
3.3.2 Resfriamento Radiante	46
3.3.2.1 Alta Massa Térmica Com Isolamento Móvel	50
3.3.2.2 Cobertura Leve Com Ventilação do Ático	52
3.3.2.3 Água Resfriada Circulando Em Sistema Fechado Pela Cobertura	53
3.3.3 Resfriamento Reflexivo	56
3.3.4 Outros Sistemas Passivos de Resfriamento	61
4. METODOLOGIA	65
4.1 AMBIENTE DE ESTUDO	66
4.2 MATERIAIS	67
4.3 MÉTODOS	71
4.4 VARIÁVEIS MANIPULADAS	73
4.5 SISTEMAS	74
4.5.1 Sistema de Resfriamento Evaporativo	75
4.5.2 Sistema de Resfriamento Radiante	79
4.5.3 Sistema de Resfriamento Reflexivo	79

4.6 TRATAMENTO DOS DADOS	80
5. RESULTADOS	81
5.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) E TESTE DE TUKEY DAS VARIÁVEIS MONITORADAS NOS TRÊS PERÍODOS	82
5.1.1 Primeiro período: Aspersão por 30min/intervalo de 30min - 21 a 25 de janeiro de 2006.....	83
5.1.2 Segundo período: Aspersão contínua - de 26 a 30 de janeiro de 2006.....	84
5.1.3 Terceiro período: Aspersão por 30min/intervalo 1h30min - de 31 de janeiro a 9 de fevereiro de 2006.	85
5.2 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) E TESTE DE TUKEY DOS TRÊS PERÍODOS MONITORADOS.....	86
5.2.1 TEMPERATURAS DAS SUPERFÍCIES INTERNAS DAS TELHAS – TT's	86
5.2.3 TEMPERATURAS DO AR DOS ÁTICOS - TAA's	87
5.2.3 TEMPERATURAS DE SUPERFÍCIE DAS LAJES VOLTADAS PARA OS ÁTICOS - TLA's.....	88
5.2.4 TEMPERATURAS DE SUPERFÍCIES DE LAJES VOLTADAS PARA AS CÉLULAS – TLC's	89
5.2.5 TEMPERATURAS DO AR DAS CÉLULAS-TESTE – TAC's.....	90
5.3 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) E TESTE DE TUKEY DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS MONITORADAS NOS TRÊS PERÍODOS	91
5.3.1 TEMPERATURA DO AR EXTERNO (Ta)	91
5.3.2 UMIDADE RELATIVA DO AR EXTERNO (U)	92
5.3.4 RADIAÇÃO SOLAR (R)	93
5.3.5 ÍNDICE PLUVIOMÉTRICO (C).....	94
5.3.6 VENTO (V).....	94
5.4 ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA (RLM)	95
6. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	101
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109
ANEXOS	117

LISTA DE FIGURAS

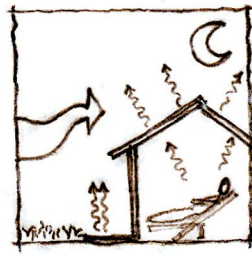
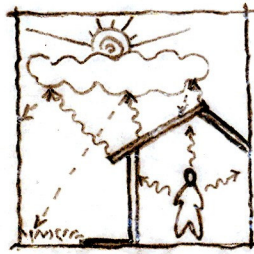
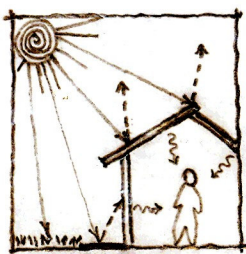
FIGURA 1 – FATORES QUE INFLUENCIAM NO CLIMA URBANO.	24
FIGURA 2 - PLANEJAMENTO DA EDIFICAÇÃO EM FUNÇÃO DO ENTORNO.	24
FIGURA 3 – CARTA BIOCLIMÁTICA DE OLGYAY.....	26
FIGURA 4 – CARTA BIOCLIMÁTICA.	27
FIGURA 5 - ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO BRASILEIRO.	30
FIGURA 6 – CARTA BIOCLIMÁTICA BRASILEIRA ADAPTADA DE GIVONI.....	31
FIGURA 7 - ZONA BIOCLIMÁTICA 3.	33
FIGURA 8 – CARTA BIOCLIMÁTICA PARA A ZONA 3.	34
FIGURA 9 – CARTA BIOCLIMÁTICA PARA A CIDADE DE CAMPINAS.	34
FIGURA 10 – UMIDADE DO AR EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO AR (TBS) E DO PONTO DE SATURAÇÃO	37
FIGURA 11 - TANQUE D’ ÁGUA COM PAINEL ISOLANTE FIXO NA COBERTURA.....	39
FIGURA 12 - ASPERSORES SOBRE PAINEL ISOLANTE NA COBERTURA.....	41
FIGURA 13 - CROQUI DA TORRE DE RESFRIAMENTO “ <i>SHOWER TOWER</i> ”.	45
FIGURA 14A – PAINEL ISOLANTE PROTEGE A COBERTURA DA RADIAÇÃO SOLAR.....	50
FIGURA 14B – TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO DA COBERTURA DURANTE A NOITE.....	50
FIGURA 15 – DEMONSTRAÇÃO DO SISTEMA “SKYTERM”: COLCHÕES OU BOLSAS PLÁSTICAS D’ ÁGUA COM ISOLAMENTO TÉRMICO MÓVEL.	51
FIGURA 16 – COBERTURA METÁLICA COM ÁTICO VENTILADO.....	52
FIGURA 17 – PERDA DE CALOR POR RADIAÇÃO DURANTE O DIA E A NOITE.....	53
FIGURA 18 – ÁGUA CIRCULANDO ENTRE SEIXOS NA COBERTURA, DIMINUI A TEMPERATURA SUPERFICIAL ATRAVÉS DA EVAPORAÇÃO. DURANTE A NOITE, ÁGUA CIRCULA ENTRE OS SEIXOS E RETIRA CALOR DA COBERTURA.	54
FIGURA 19 – DECRÉSCIMO DO ALBEDO EM RELAÇÃO À EXPOSIÇÃO ÀS INTEMPÉRIES.	59
FIGURA 20 – CROQUI PARCIAL DO CAMPUS DA UNICAMP.....	67
FIGURA 21 – VISTA NORDESTE DAS CÉLULAS-TESTE.	68
FIGURA 22 – PLANTA DA CÉLULA-TESTE.....	69
FIGURA 23 – CORTE AA DA CÉLULA-TESTE.	69
FIGURA 24 – ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.	72
FIGURA 25 – POSICIONAMENTO DOS TERMOPARES NAS CÉLULAS-TESTE.....	74
FIGURA 26 – VISTA DAS QUATRO CÉLULAS-TESTE: AO FUNDO: À ESQUERDA A CÉLULA DE REFERÊNCIA E À DIREITA O SISTEMA EVAPORATIVO. A FRENTE: À ESQUERDA O SISTEMA RADIANTE E À DIREITA O SISTEMA REFLEXIVO.....	75
FIGURA 27 – CROQUI DO POSICIONAMENTO DOS TRÊS ASPERSORES NA COBERTURA. INCLINAÇÃO NO SENTIDO OESTE-LESTE.	76

FIGURA 28A – VISTA LESTE DE DUAS CÉLULAS-TESTE: A DE REFERÊNCIA E COM O RESFRIAMENTO EVAPORATIVO.	77
FIGURA 28B – CROQUI ESQUEMÁTICO DA ALIMENTAÇÃO DO RESFRIAMENTO EVAPORATIVO.	77
FIGURA 29 – VISTA DO FUNCIONAMENTO DOS ASPERSORES NA COBERTURA.	78
FIGURA 30 – APLICAÇÃO DO FILME DE ALUMÍNIO NA TELHA.	79
FIGURA 31 – TELHA COM APLICAÇÃO DA PINTURA NA COR BRANCA.....	80
FIGURA 32: TESTE DE TUKEY ($\alpha = 0,05$) PARA 1º PERÍODO MONITORADO DE 21 A 25 DE JAN/2006 (ASPERSÃO DE 30MIN, INTERVALO DE 30MIN).	83
FIGURA 33: TESTE DE TUKEY ($\alpha = 0,05$) PARA O 2º PERÍODO MONITORADO, DE 26 A 30 DE JAN/2006 (ASPERSÃO CONTINUA).	84
FIGURA 34: TESTE DE TUKEY ($\alpha = 0,05$) PARA O 3º PERÍODO MONITORADO DE 31/JAN A 9/FEV/2006 (ASPERSÃO DE 30MIN, INTERVALO DE 1H30MIN).....	85
FIGURA 35: TESTE DE TUKEY ($\alpha = 0,05$) PARA OS TRÊS PERÍODOS MONITORADOS: 1º PERÍODO (21 A 25 DE JAN/2006, ASPERSÃO DE 30MIN, INTERVALO DE 30MIN), 2º PERÍODO (26 A 30 DE JAN/2006, ASPERSÃO DIRETA) E 3º PERÍODO (31/JAN A 9/FEV/2006, ASPERSÃO DE 30MIN, INTERVALO DE 1H30MIN).	86
FIGURA 36: TESTE DE TUKEY ($\alpha = 0,05$) PARA OS TRÊS PERÍODOS MONITORADOS: 1º PERÍODO (21 A 25 DE JAN/2006, ASPERSÃO DE 30MIN, INTERVALO DE 30MIN), 2º PERÍODO (26 A 30 DE JAN/2006, ASPERSÃO DIRETA) E 3º PERÍODO (31/JAN A 9/FEV/2006, ASPERSÃO DE 30MIN, INTERVALO DE 1H30MIN).	87
FIGURA 37: TESTE DE TUKEY ($\alpha = 0,05$) PARA OS TRÊS PERÍODOS MONITORADOS: 1º PERÍODO (21 A 25 DE JAN/2006, ASPERSÃO DE 30MIN, INTERVALO DE 30MIN), 2º PERÍODO (26 A 30 DE JAN/2006, ASPERSÃO DIRETA) E 3º PERÍODO (31/JAN A 9/FEV/2006, ASPERSÃO DE 30MIN, INTERVALO DE 1H30MIN).	88
FIGURA 38: TESTE DE TUKEY ($\alpha = 0,05$) PARA OS TRÊS PERÍODOS MONITORADOS: 1º PERÍODO (21 A 25 DE JAN/2006, ASPERSÃO DE 30MIN, INTERVALO DE 30MIN), 2º PERÍODO (26 A 30 DE JAN/2006, ASPERSÃO DIRETA) E 3º PERÍODO (31/JAN A 9/FEV/2006, ASPERSÃO DE 30MIN, INTERVALO DE 1H30MIN).	89
FIGURA 39: TESTE DE TUKEY ($\alpha = 0,05$) PARA OS TRÊS PERÍODOS MONITORADOS: 1º PERÍODO (21 A 25 DE JAN/2006, ASPERSÃO DE 30MIN, INTERVALO DE 30MIN), 2º PERÍODO (26 A 30 DE JAN/2006, ASPERSÃO DIRETA) E 3º PERÍODO (31/JAN A 9/FEV/2006, ASPERSÃO DE 30MIN, INTERVALO DE 1H30MIN).	90
FIGURA 40: TESTE DE TUKEY ($\alpha = 0,05$) PARA A TEMPERATURA DO AR EXTERNO (°C) NOS TRÊS PERÍODOS MONITORADOS.	91
FIGURA 41: TESTE DE TUKEY ($\alpha = 0,05$) PARA A UMIDADE RELATIVA DO AR EXTERNO (%) NOS TRÊS PERÍODOS MONITORADOS.	92
FIGURA 42: TESTE DE TUKEY ($\alpha = 0,05$) PARA A RADIAÇÃO SOLAR (W/M²) NOS TRÊS PERÍODOS MONITORADOS.	93
FIGURA 43: TESTE DE TUKEY ($\alpha = 0,05$) PARA O ÍNDICE PLUVIOMÉTRICO (MM) NOS TRÊS PERÍODOS MONITORADOS.	94
FIGURA 44: TESTE DE TUKEY ($\alpha = 0,05$) PARA VENTO (M/S) NOS TRÊS PERÍODOS MONITORADOS.	94
FIGURA 45 – PERIFERIA DE CAMPINAS: HOMOGENEIDADE DAS CONSTRUÇÕES, SEM LAJE DE FORRO, TELHA DE FIBROCIMENTO E ALVENARIA SEM REBOCO EXTERNO. FOTO DA AUTORA.	102
FIGURA 46 – VISTA DA ASPERSÃO D'ÁGUA EM UM DOS ASPERSORES NA COBERTURA.	105
FIGURA 47 – VISTA DA BOBINA DE FILME ADESIVO DE ALUMÍNIO, COM 1M DE LARGURA.	105
ANEXO A - MÉDIAS HORÁRIAS DE TT NO PERÍODO DE 21 A 25/JAN/2006.....	118
ANEXO B - MÉDIAS HORÁRIAS DE TT NO PERÍODO DE 26 A 30/JAN/2006.....	119
ANEXO C- MÉDIAS HORÁRIAS DE TT NO PERÍODO DE 31/JAN A 9/FEV/2006.....	120
ANEXO D - MÉDIAS HORÁRIAS DE TAA NO PERÍODO 21 A 25/JAN/2006.....	121
ANEXO E - MÉDIAS HORÁRIAS DE TAA NO PERÍODO DE 26 A 30/JAN/2006.....	121
ANEXO F- MÉDIAS HORÁRIAS DE TAA NO PERÍODO DE 31/JAN A 9/FEV/2006.....	123
ANEXO G - MÉDIAS HORÁRIAS DE TLA NO PERÍODO DE 21 A 25/JAN/2006.....	124
ANEXO H - MÉDIAS HORÁRIAS DE TLA NO PERÍODO DE 26 A 30/JAN/2006.....	125
ANEXO I - MÉDIAS HORÁRIAS DE TLA NO PERÍODO DE 31/JAN A 9/FEV/2006.....	126
ANEXO J - MÉDIAS HORÁRIAS DE TLC NO PERÍODO DE 21 A 25/JAN/2006.....	127
ANEXO K - MÉDIAS HORÁRIAS DE TLC NO PERÍODO DE 26 A 30/JAN/2006.....	128
ANEXO L - MÉDIAS HORÁRIAS DE TLC NO PERÍODO DE 31/JAN A 9/FEV/2006.....	129
ANEXO M - MÉDIAS HORÁRIAS DE TACNO PERÍODO DE 20 A 25/JAN/2006.....	130
ANEXO N - MÉDIAS HORÁRIAS DE TACNO PERÍODO DE 26 A 31/JAN/2006.....	131
ANEXO O - MÉDIAS HORÁRIAS DE TAC NO PERÍODO DE 31/JAN A 9/FEV/2006.....	132

LISTA DE TABELAS

TABELA 1–	TÉCNICAS PASSIVAS DE RESFRIAMENTO E AQUECIMENTO.....	28
TABELA 2–	TÉCNICAS PASSIVAS DE RESFRIAMENTO E AQUECIMENTO – ABNT.....	32
TABELA 3–	COMPORTAMENTO DOS CORPOS OPACOS À ENERGIA RADIANTE NO INFRAVERMELHO LONGÍNQUO.....	48
TABELA 4–	COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DE ALGUNS CORPOS OPACOS.....	58
TABELA 5–	PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS CONSTRUTIVOS.....	70
TABELA 6–	ANÁLISE DE REGRESSÃO - 1ºPERÍODO – 21 A 25 DE JANEIRO DE 2006.....	97
TABELA 7–	ANÁLISE DE REGRESSÃO - 2ºPERÍODO – 26 A 30 DE JANEIRO DE 2006.....	98
TABELA 8–	ANÁLISE DE REGRESSÃO - 3ºPERÍODO – 31 DE JANEIRO A 9 DE FEVEREIRO DE 2006.....	99

1. INTRODUÇÃO



Com a crise mundial de energia no final do século passado, retomam-se com maior empenho pesquisas na área do condicionamento passivo (aquecimento e resfriamento) de edificações. Procurando avaliar o desempenho de técnicas passivas para as mais diversas e distintas localidades do mundo, alguns pesquisadores desenvolveram parâmetros e metodologias para o desenvolvimento de uma arquitetura aplicada ao clima local, o que possibilita ressaltar técnicas vernáculas e materiais construtivos locais.

Por outro lado, a globalização da arquitetura propicia que edificações sejam reproduzidas nas diversas partes do mundo, com semelhantes, senão os mesmos, materiais e tecnologias. Frequentemente são construídas torres de vidros em climas tropicais, nas quais pessoas se submetem a jornadas de trabalho de oito, dez horas, respirando um ar condicionado artificialmente e, muitas vezes por falta ou má qualidade da manutenção, contaminado. Multiplicam-se residências que adotam materiais e soluções construtivas baseados em catálogos que comercializam um sonho de consumo bem distante da realidade brasileira.

Nos grandes centros metropolitanos ocorrem as piores alterações nas condições naturais do microclima local, além de concentrarem o maior emprego de energia para o condicionamento artificial de ambientes, que, somado aos problemas citados anteriormente acentuam em muito o desconforto térmico nas edificações e o desperdício energético.

Se, por um lado, são ignoradas as variáveis climáticas em favor de modismos e de uma variedade de materiais que não refletem a nossa realidade, para uma grande parte da população brasileira, de baixo poder econômico, revelam-se moradias homogêneas, com tendência a ignorar o reboco da alvenaria externa, a laje ou forro de cobertura, entre outros elementos construtivos. Assim, toda a hostilidade de um clima tropical é repassada para o interior das edificações, visto que se caracterizam, em sua maioria, por construções de baixa ou quase nenhuma massa térmica, principalmente se considerando a cobertura, confeccionada frequentemente de telhas de fibrocimento.

O aquecimento dos ambientes internos em uma edificação é resultante de dois tipos de fontes: artificial e natural. O calor antropogênico, resultante das atividades humanas, bem como os equipamentos domésticos, são responsáveis por um aumento da temperatura

interna em edificações, denominando-se fonte artificial. Mas, a assim denominada fonte natural é a maior responsável pelo aquecimento: a radiação solar (ondas curtas) e a re-emissão desta radiação, absorvida pelas superfícies do entorno, através de ondas longas. A cobertura de uma edificação está proporcionalmente mais exposta às condições climáticas do que outros fechamentos, principalmente à radiação solar e é um dos grandes responsáveis pelo aquecimento do ar interno.

Assim, em climas tropicais, as temperaturas das superfícies externas das construções são altas, refletindo no fluxo energético transmitido para o interior das mesmas. Conseqüentemente, as temperaturas internas atingem altos valores, principalmente no período da tarde ou noite, podendo variar de acordo com a massa térmica da edificação. Este fenômeno causa ao homem desconforto térmico e um aumento na utilização de métodos artificiais de refrigeração do ambiente, gerando um aumento do consumo de energia.

Pesquisas internacionais analisam o desempenho de muitas técnicas passivas, a maioria delas aplicada em países de clima temperado. Países com clima quente, como Grécia, Índia, algumas localidades dos Estados Unidos e Japão, também trazem pesquisas neste âmbito, enfatizando o resfriamento e ou isolamento da cobertura nas construções.

Nacionalmente, as pesquisas com técnicas passivas são poucas, principalmente se observada a extensa porção de terras localizadas em baixas latitudes, entre a Linha do Equador e o Trópico de Capricórnio. Encontram-se referências que trazem recomendações de projeto para algumas localidades; outras avaliam o desempenho de algumas técnicas passivas para cidades como Florianópolis-SC, Passo do Lontra-MS, Recife-PE, São Carlos-SP.

Neste sentido, algumas considerações podem ser admitidas pelos projetistas para a melhoria do conforto térmico, atendendo a cuidados de implantação, especificação adequada de materiais construtivos, distribuição dos ambientes internos de acordo com as atividades neles exigidas. Se por um lado os projetistas dispõem de informações referentes às necessidades humanas para cada tipo de edificação, por outro, pesquisadores podem

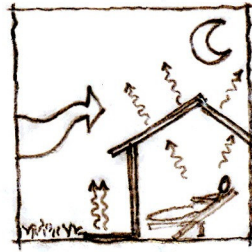
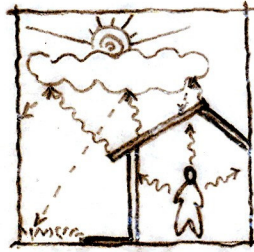
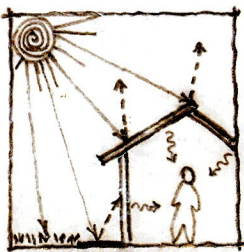
oferecer tanto ferramentas úteis, como também, materiais construtivos e técnicas passivas de condicionamento adequado às condições climáticas de cada local.

Diante de tais considerações, faz-se necessário o incentivo a pesquisas destinadas a avaliar a contribuição das técnicas passivas para as diversas localidades, com características climáticas e perfis econômicos e culturais bem distintos.

Portanto, através da relevância do tema proposto, justifica-se a pesquisa aqui apresentada, onde se pretende aferir a seguinte hipótese:

O uso de técnicas passivas aplicadas em coberturas de telhas de fibrocimento é viável para o clima de Campinas-SP, a ponto de incentivar sua incorporação pelo corpo técnico e sua gradativa aceitação pela população?

2. OBJETIVO

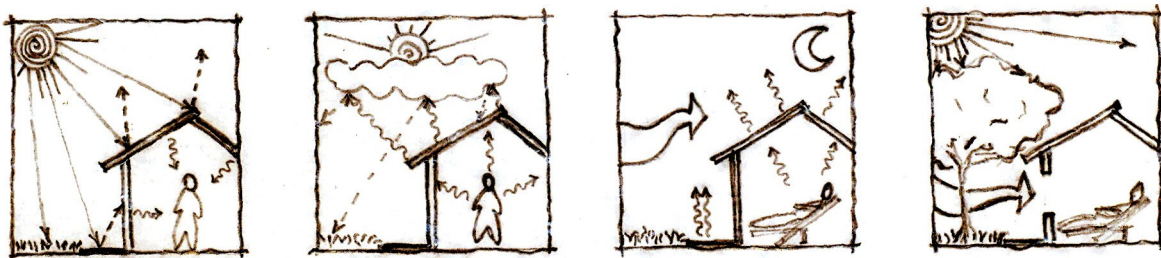


O objetivo geral desta pesquisa é verificar o desempenho comparativo de técnicas passivas de resfriamento em coberturas para a cidade de Campinas-SP.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Monitorar o desempenho térmico das coberturas
- Apontar a técnica passiva mais eficiente, no período monitorado, para a cidade de Campinas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA



Para o propósito da dissertação foi necessário investigar autores relevantes aos tópicos relacionados a seguir, embasando assim a fase experimental:

- **Conforto Térmico**
- **Arquitetura Bioclimática**
- **Resfriamento Passivo**

3.1 CONFORTO TÉRMICO

3.1.1 Trocas de Calor: Ambiente e Materiais

O conforto térmico, em edificações, pode ser obtido controlando-se os vários processos de transferência de calor entre os ambientes interno e externo, através dos materiais construtivos do ambiente.

As trocas de calor podem ocorrer por condução, convecção, radiação, as chamadas trocas secas, ou por evaporação ou condensação, também consideradas trocas úmidas. Elas estão relacionadas às propriedades termofísicas dos materiais utilizados na edificação. Estas propriedades têm seus valores e coeficientes calculados ou medidos e encontram-se tabelados por autores clássicos desta literatura. As principais propriedades são:

- Condutividade (λ), resistência (R) e condutância térmica (C);
- Absortância (α), refletância (ρ) e transmitância (τ) dos materiais em relação à radiação de onda curta;
- Coeficientes de absorção (α), reflexão (ρ), transmissão (τ) e emissividade (ε) para radiação de ondas longas;
- Coeficiente de convecção superficial (h_c);
- Coeficiente global de transmissão térmica (U);

- Calor específico (c) e capacidade térmica (C); distingue-se capacidade térmica volumétrica (cpV) como produto do calor específico por densidade e volume; e capacidade térmica superficial (cpd) como produto calor específico, densidade e espessura do componente.

Além disso, para assegurar condições de conforto interno à edificação, o projetista deve projetar o invólucro do edifício, para que este interagindo com o microclima interno, aproveite-se da pouca ou alta massa térmica dos fechamentos, ou do isolamento de materiais, ou da transparência de vidros. Utiliza-se das características físicas dos materiais e da tecnologia desenvolvidos para a construção civil nas condições climáticas locais.

Estes processos de trocas de calor entre o ambiente e os materiais construtivos relacionam-se aos tipos de matérias-primas empregadas, cujas propriedades termo-físicas podem ser modificadas pelo emprego de materiais de acabamentos, cores, rugosidade, etc.

3.1.2 Trocas de Calor: Homem e Ambiente

As trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente, ocorrem pelos processos:

- Convecção com o ar;
- Radiação com as superfícies circundantes;
- Evaporação na superfície da pele e na expiração do ar dos pulmões.

Para que o equilíbrio térmico seja mantido, mecanismos de termo-regulação agem para equilibrar as taxas de produção e dissipação de calor. Através da vestimenta adequada ao clima, o ser humano também contribui para este equilíbrio do organismo e pela sensação de conforto térmico no ambiente construído (Ruas, 2002).

A ASHRAE (2004) - American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers - define conforto térmico como aquele estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa, num contexto individual de considerações fisiológicas e psicológicas.

Segundo Chvatal (1998), no interior das edificações, as condições de conforto são determinadas pela combinação de fatores ambientais, pessoais e subjetivos; cabendo ao projetista propiciar ambientes com valores adequados dos fatores ambientais.

Os fatores ambientais correspondem à temperatura do ar ambiente, temperatura radiante média, umidade relativa do ar e velocidade do ar. Já os fatores pessoais dependem da atividade desenvolvida pela pessoa, que define a taxa de produção de calor metabólico, da resistência térmica da vestimenta e da adaptação psico-fisiológica à nova situação térmica. Esta última em caso de mudança para localidade de clima bastante distinto do local de origem. Para indicação de alguns destes fatores subjetivos e psico-fisiológicos são utilizadas Escalas de Conforto Térmico que podem ser semânticas ou numéricas, montadas em termos de sensações subjetivas graduadas por conforto e desconforto térmico.

Nas últimas décadas várias pesquisas foram desenvolvidas, aprimorando ou desenvolvendo os índices de conforto, tais como Fanger (1970), ASHRAE (1981 e 1992), entre outros.

Com base nos vários estudos foram estabelecidas as Zonas de Conforto Térmico, em geral plotadas em nomogramas ou diagramas que limitam e definem o domínio das mesmas. Com base na observação do clima local e em estudos com materiais, prevê-se o comportamento térmico da edificação através das zonas acima mencionadas. Este conjunto de informações é denominado Carta Bioclimática.

Segundo Givoni (2003a) e Givoni et al (2003b) pessoas que habitam edifícios sem condicionamento artificial são mais tolerantes às alternâncias de temperaturas do que pessoas que vivem em edifícios climatizados artificialmente. O intervalo de temperatura, aceitável para a faixa do conforto humano, é mais generoso em edifícios naturalmente condicionados do que em edifícios climatizados artificialmente. Isto se reflete diretamente na zona de plotagem das cartas dos edifícios, ampliando ou reduzindo limites e estratégias a serem adotadas.

Em sua publicação, o autor Givoni (1992) relata sobre uma pesquisa realizada junto aos habitantes de Colima, México. Verificou que o clima nos meses de junho a outubro, segundo a carta da ASHRAE, estaria fora dos limites aceitáveis da zona de conforto. No

entanto, os habitantes do local foram questionados sobre suas sensações de conforto para o período citado. Observou-se que pelo menos nas primeiras e nas últimas horas dos dias, o clima era confortável, tanto dentro como fora dos edifícios.

3.2 ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA

3.2.1 Bioclimatologia

Clima [do grego Klima: inclinação], etimologicamente designa conhecimento de ordem astronômica e cosmográfica, aplicado à superfície terrestre, caracterizada por condições atmosféricas comparáveis (Bogo et al, 1994). A climatologia é um estudo mais aprofundado dos elementos e fatores climáticos, nas diversas áreas de conhecimento humano. Assim, aplicada ao estudo da relação dos seres vivos, tem-se a Bioclimatologia, com ênfase animal, vegetal ou humana.

Na Arquitetura, a Bioclimatologia é aplicada quando se associam as variáveis relacionadas ao clima e ao conforto. Através dos materiais construtivos e da qualidade do projeto arquitetônico é possível aperfeiçoá-lo ou evitar que condições climáticas extremas interferiram diretamente nas condições de conforto humano no interior das construções.

Os fatores naturais, como: latitude, topografia, e proximidades de grandes massas de águas e terras, influenciam o clima e conseqüentemente interferem no comportamento dos materiais construtivos da edificação. A ação antrópica no ambiente natural, com suas conseqüências e sua complexidade, atua alterando o clima tanto em escala topo (região metropolitana) como micro (terreno da edificação). Como exemplo, tem-se a emissão de poluentes, alta concentração humana e de construções em grandes centros, impermeabilização do solo e emissão de calor antropogênico (figura 1).

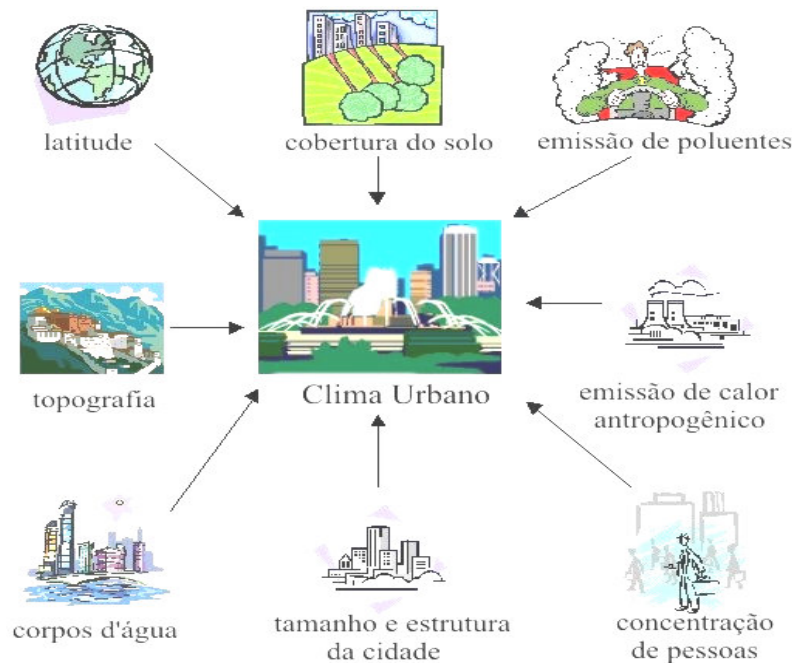


Figura 1 – Fatores que influenciam no clima urbano.

Fonte: Adaptado de http://www.atmosphere.mpg.de/enid/0,55a304092d09/2_clima_urbano/_qu_lo_controla_3x3.html.

A análise do clima urbano, em escala topo e micro, interferem diretamente no planejamento da edificação, através de fatores como orientação, insolação, ventilação e proximidade de corpos verdes, conforme ilustra a Figura 2.

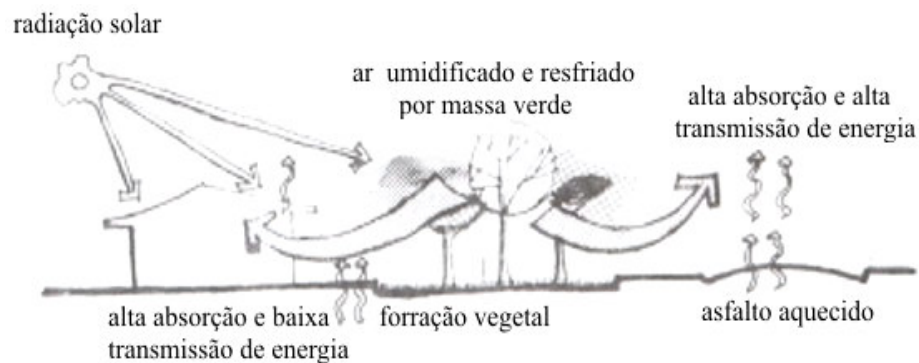


Figura 2 - Planejamento da edificação em função do entorno.

Fonte: Adaptado de Romero, 1988.

A escolha dos materiais construtivos mais adequados para o bom desempenho térmico da construção vai interferir em seu potencial de absorver mais ou menos calor, ou refletir mais ou menos energia.

Assim, a Arquitetura Bioclimática aplica os elementos arquitetônicos, climáticos e tecnológicos para edificar ambientes confortáveis termicamente e, conseqüentemente, mais racionais quanto ao consumo de energia. No início da década de sessenta, o pesquisador Vitor Olgyay publica o livro *Design with Climate*, apresentando a aplicação da Bioclimatologia à Arquitetura como ferramenta hábil para proporcionar condições de conforto térmico humano no interior de construções, cunhando o termo Projeto Bioclimático.

3.2.2 Carta Bioclimática

Olgyay (2002) em seus estudos elaborou um diagrama, a Carta Bioclimática, onde são indicadas coordenadas para determinar as zonas de conforto, em função de pares de valores de temperatura e umidade relativa do ar (figura 3). Neste estudo foram consideradas as temperaturas externas semelhantes às internas, onde as diferenças entre elas eram mínimas, devido a pouca massa térmica do edifício.

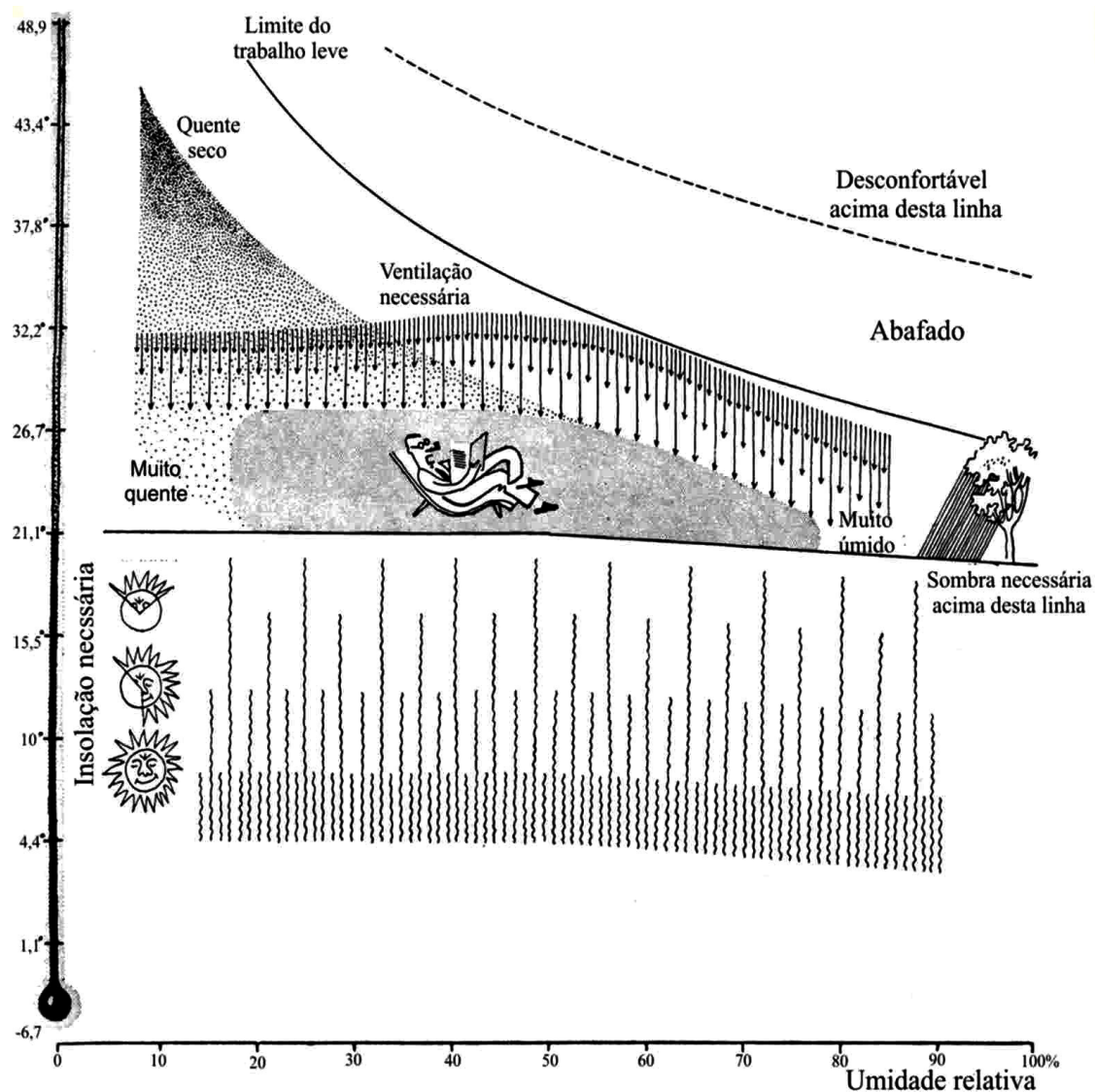


Figura 3 – Carta Bioclimática de Olgay.

Fonte: Adaptada de Olgay, 2002.

Mais tarde, na década de 70, Givoni (1997a) adaptou a Carta Bioclimática de Olgay para construções com alta massa térmica. Neste caso, a inércia térmica fez com que as temperaturas internas fiquem mais baixas que as externas durante o dia no período de verão. Através desta Carta Bioclimática adaptada, construída sobre a Carta Psicrométrica, Givoni (1992) expressou considerações climáticas para arquitetura de edifícios e desenho urbano. Assim, mostrou-se a possibilidade de se atender as exigências de conforto através

de técnicas de resfriamento ou aquecimento passivo direto e indireto, dependendo das características físicas do clima (figura 4).

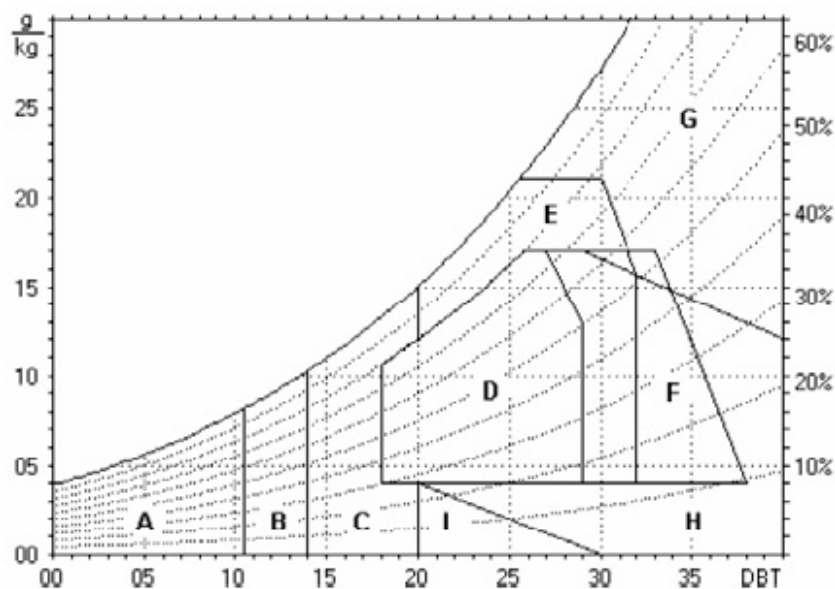


Figura 4 – Carta Bioclimática.

Fonte: Adaptada de Givoni, 1992.

Cada letra, indicada na Carta, representa uma região de temperatura e umidade, para a qual é recomendável a aplicação de uma técnica passiva. Porém, há situações em que as condições climáticas são muito hostis e somente o condicionamento passivo não é suficiente, como as letras A e G, com aquecimento artificial e resfriamento artificial, respectivamente (Tabela 1). Assim, recomenda-se a utilização de sistema mecânico, porém seu emprego será menos intenso, devido à associação ao sistema passivo.

TABELA 1: Técnicas passivas de resfriamento e aquecimento. Adaptado de Givoni, 1992.

Letra	Técnica Recomendável
A	Aquecimento artificial
B	Aquecimento solar
C	Massa térmica
D	Conforto térmico
E	Ventilação
F	Massa Térmica (resfriamento)
G	Resfriamento artificial
H	Resfriamento evaporativo
I	Umidificação do ar

A Arquitetura Bioclimática é uma área que vem despertando interesse em grupos de pesquisadores, principalmente de países tropicais. Os autores Waewsak et al (2003) investigaram o desempenho de uma cobertura bioclimática, desenvolvida especialmente pelo corpo técnico de “The Building Scientific Research Center (BSRC)”, para o clima de Bangkok, Tailândia. Foram monitorados: o desempenho térmico e lumínico da cobertura bioclimática, que demonstraram o potencial da cobertura em reduzir significativamente o ganho de calor. A cobertura, de telhas de concreto e acrílico com forro de gesso e alumínio, promove a indução de trocas de calor e iluminação suficiente para residências sem qualquer aquecimento do ar. Segundo os autores, o conceito pode ser aplicado em outros componentes construtivos como paredes.

Givoni (1994b) apresenta vários sistemas de resfriamento passivo e suas aplicabilidade para os diferentes climas e tipos de edifícios. Destacam-se as técnicas passivas: resfriamento

radiante e por ventilação; resfriamento evaporativo direto e indireto, entre outras. Estas técnicas serão melhores abordadas na seção: Resfriamento Passivo.

3.2.3 Tratamento Climático e Recomendações de Projeto

De acordo com Givoni (1994a), a cobertura é o componente do edifício mais exposto aos fatores climáticos. O impacto da radiação solar em dias claros de verão, as perdas de calor por radiação de onda longa durante a noite, chuvas e neve no inverno, afetam a cobertura mais que qualquer outra parte do edifício.

Assim, para a concepção de um projeto bioclimático é necessário conhecer as características do clima do local em estudo. Considerações com a implantação, orientação e o atendimento às recomendações climáticas são fundamentais para melhorar as condições térmicas de um ambiente. É neste sentido que Alucci et al (1986) elaboram um manual de recomendação e adequação climática, no qual apresentam um procedimento para identificação do tipo de clima característico para cada região do território brasileiro, através de intervalos de conforto. Estes tipos climáticos são definidos em função da temperatura média anual típica da região e da umidade relativa média. Para tipos climáticos compostos, devido às diversas solicitações térmicas ao longo do ano, as recomendações são contraditórias e deve-se prevalecer o bom senso do projetista e seu conhecimento do local.

Chvatal (1998) faz um estudo das diversas metodologias para tratamento dos dados climáticos com algumas recomendações de projeto, destacando autores como Rivero (1986), Aroztegui (1995), Evans & Schiller (1991) e Mahoney (apud Nações Unidas, 1973). Conclui-se que as várias metodologias analisadas, quando se destaca um determinado clima, apresentam pontos divergentes e contraditórios, provavelmente devido a tipos de climas compostos.

3.2.4 Zoneamento Bioclimático Brasileiro

A Associação Brasileira de Normas Técnicas editou em 2005 a Norma Técnica 15220. Provéem de um estudo que dividiu o território brasileiro em oito zonas relativamente homogêneas quanto ao clima. Para tais, formulou-se um conjunto de recomendações

técnico-construtivas, com objetivo de otimizar o desempenho térmico das edificações, adequando assim as construções às condições climáticas, conforme ilustra a Figura 5.

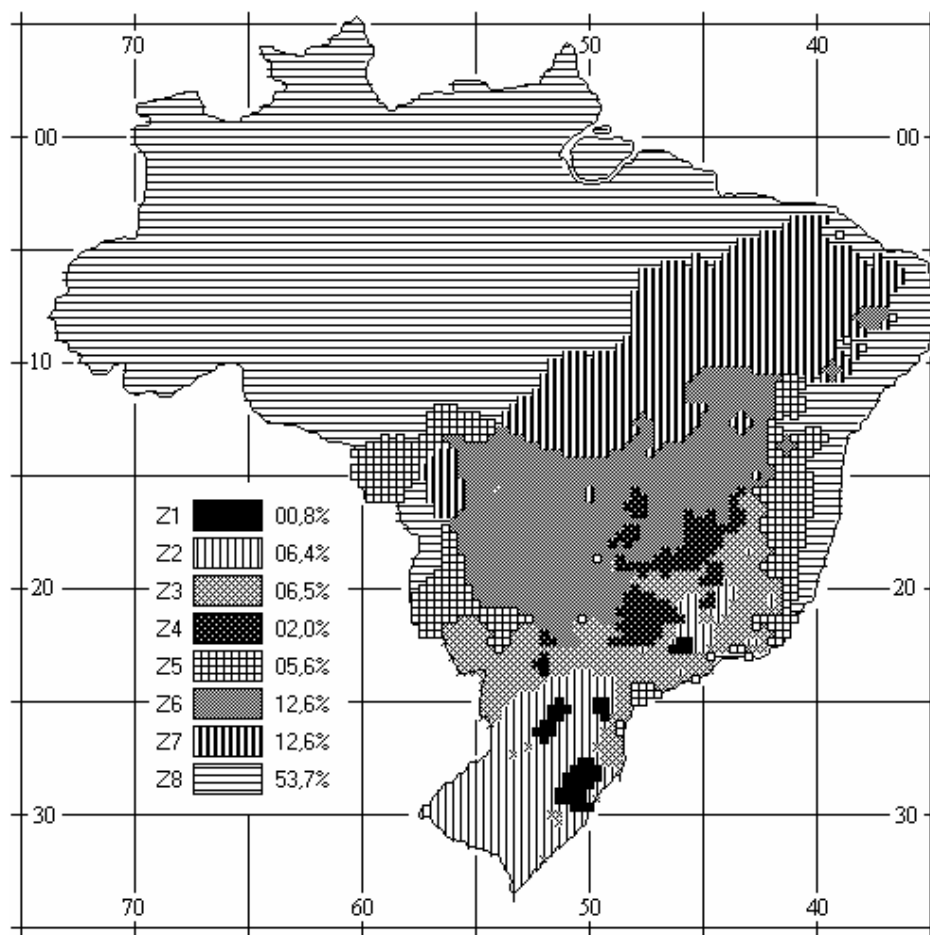


Figura 5 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro.

Fonte: ABNT, 2005.

Esta divisão baseou-se nas Normais Climatológicas medidas: de 1961 a 1990 em 206 cidades; de 1931 a 1960 em 124 cidades; e para as demais cidades, estimou-se o clima por interpolação. As cidades foram agrupadas através das médias mensais de temperaturas: máximas e mínimas e as médias mensais da umidade relativa do ar.

Para a classificação bioclimática, das oito zonas, adotou-se uma Carta Bioclimática (figura 6) adaptada a partir daquela sugerida por Givoni (1992).

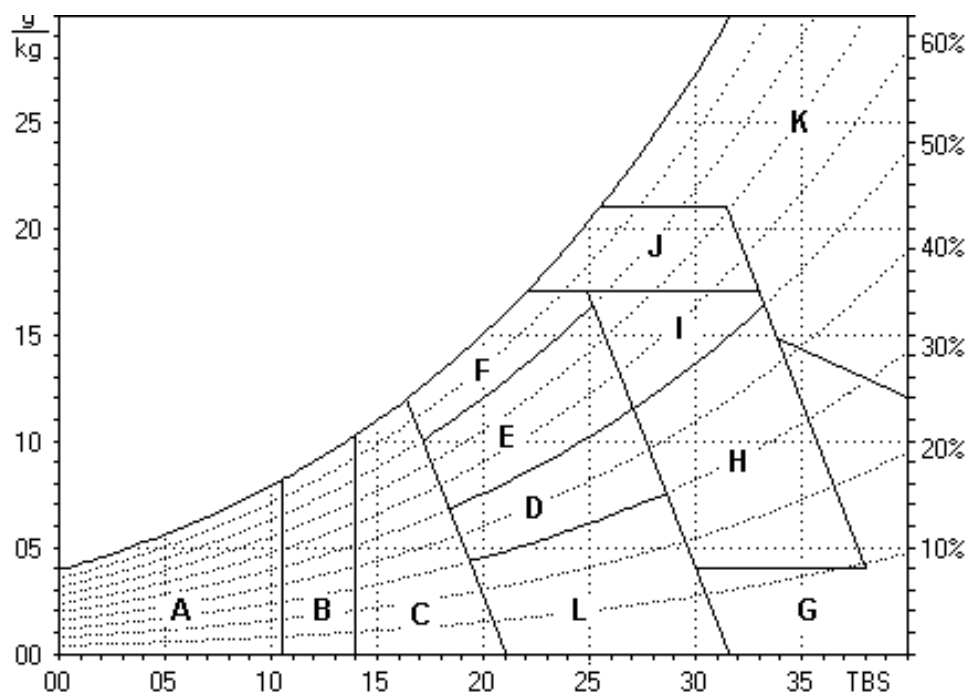


Figura 6 – Carta bioclimática brasileira adaptada de Givoni.

Fonte: ABNT, 2005.

Nesta Carta são plotados os valores de umidade relativa, temperatura de bulbo seco e a quantidade de vapor d'água contida no ar, obtendo-se as áreas limites indicadas por letras que correspondem a uma técnica de resfriamento ou aquecimento passivo como mostra a Tabela 2.

As letras são indicadas em ordem alfabética, e o conjunto obtido irá recomendar a técnica mais adequada ao clima em questão. Importante salientar que em condições climáticas extremas, correspondentes as letras A e K, faz-se necessário a utilização de métodos de climatização artificial conjuntamente às técnicas passivas para assegurar ambientes confortáveis.

TABELA 2: Técnicas passivas de resfriamento e aquecimento.
Adaptado de ABNT, 2005.

Letra	Técnica Recomendável
A	Zona de aquecimento artificial (calefação)
B	Zona de aquecimento solar da edificação
C	Zona de massa térmica para aquecimento
D	Zona de conforto térmico (baixa umidade)
E	Zona de conforto térmico
F	Zona de desumidificação (renovação do ar)
G + H	Zona de resfriamento evaporativo
H + I	Zona de massa térmica de refrigeração
I + J	Zona de ventilação
K	Zona de refrigeração artificial
L	Zona de umidificação do ar

A Norma (ABNT, 2005) também apresenta as diretrizes construtivas relativas às aberturas para ventilação e diretrizes construtivas relativas à transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar para paredes externas e coberturas.

A cidade de Campinas está incluída na Zona 3, englobando cidades como Florianópolis, Foz de Iguaçu, Londrina, Petrópolis e Porto Alegre (figura 7).

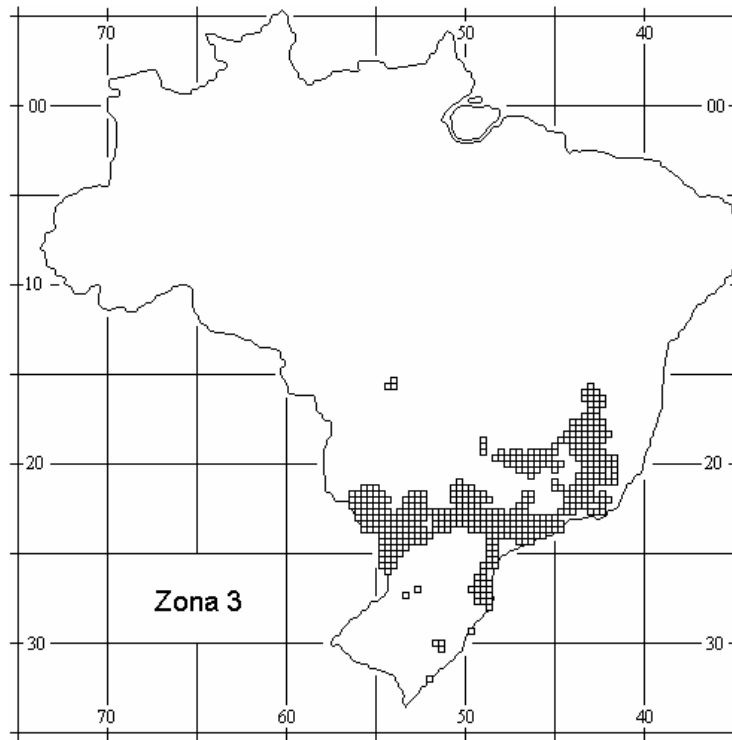


Figura 7 - Zona Bioclimática 3.

Fonte: ABNT, 2005.

A Carta Bioclimática a seguir (figura 8), ilustra uma das 62 cidades incluídas nesta zona 3, Florianópolis-SC, na qual foram plotadas as normais climatológicas. Observa-se, para o verão: a indicação da técnica J (Ventilação cruzada) e para o inverno: as técnicas B (Aquecimento solar da edificação) e C (Vedações internas pesadas - inércia térmica).

Com a plotagem das médias das temperaturas máximas, mínimas e da umidade relativa da cidade de Campinas (figura 9), obteve-se indicação das letras BCEFI correspondendo ao aquecimento solar da edificação; uso de massa térmica para aquecimento; ventilação seletiva e cobertura com maior massa térmica respectivamente.

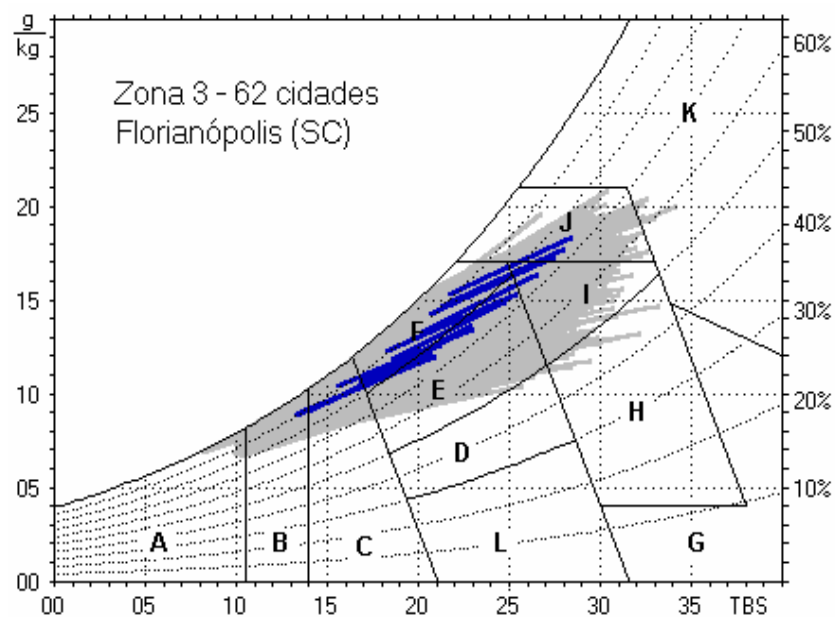


Figura 8 – Carta Bioclimática para a Zona 3.

Fonte: ABNT, 2005.

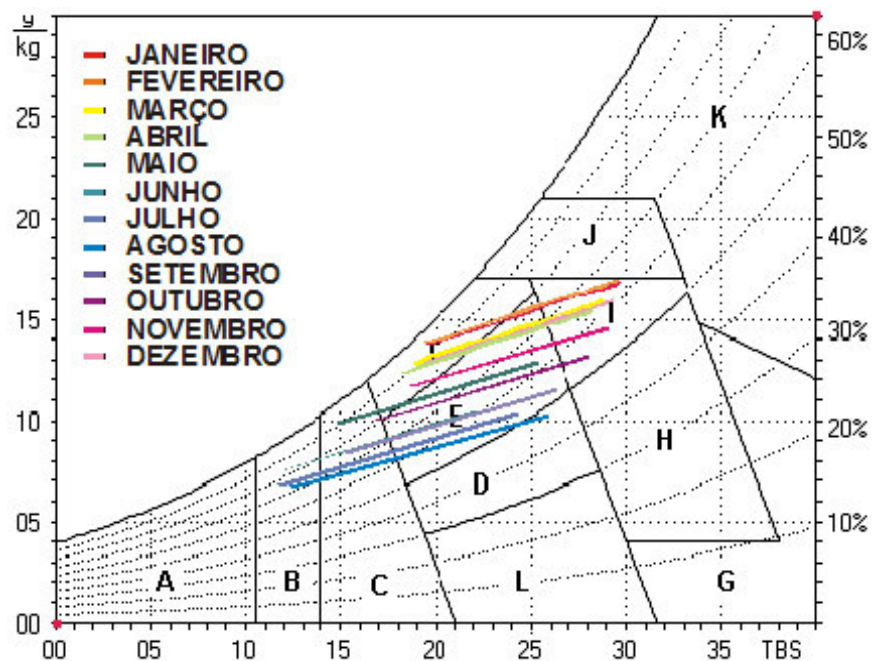


Figura 9 – Carta Bioclimática para a Cidade de Campinas.

Fonte: Roriz, 2004.

3.3. RESFRIAMENTO PASSIVO

3.3.1. Resfriamento Evaporativo

Resfriar o ar através da evaporação d'água não é uma técnica inovadora. Na antiguidade, em localidades de clima quente e seco, pátios com vegetação e fontes d'água climatizavam os ambientes que se voltavam para eles, atenuando a temperatura e a hostilidade do ar seco.

Já na modernidade, o resfriamento evaporativo está ligado ao desenvolvimento da indústria de ar-condicionado. Segundo Cook (2002), nos Estados Unidos, em 1900, C.F. Marvin publicou tabelas com os primeiros dados psicrométricos, evidenciando a preocupação em entender as relações entre pressão de vapor, umidade relativa, temperatura de ponto de orvalho. No pós-guerra, o desenvolvimento de novos materiais, fontes de alimentação e atenuação do ruído, contribuiu para a evolução do resfriamento evaporativo como técnica de condicionamento de ambientes.

Basicamente, há dois tipos de resfriamento através da evaporação de água. O resfriamento evaporativo direto ocorre quando a refrigeração do ar é realizada através da adição direta de água. Uma vez umidificado o ar, a evaporação da água tende a diminuir sua temperatura. O fluxo de ar resfriado pode ser introduzido na edificação através de sistemas mecânicos ou passivos, como: vento, diferença de temperatura interna e externa, aspersores, fontes d'água ou torres de resfriamento.

O resfriamento passivo indireto ocorre na interface sólido-líquido. Por exemplo, um dado elemento construtivo da edificação que de preferência receba insolação direta, como coberturas ou paredes, em contato com a água, em temperatura mais baixa. Este processo de evaporação d'água tem sua temperatura atenuada e caracteriza-se pela formação de bolhas de vapor que crescem e se desprendem da superfície. Transformado o calor sensível da água em calor latente, retira-se assim, uma grande quantidade de calor que contribuiria para elevar a temperatura do material. Ou seja, há transferência de calor da superfície sólida para o líquido devido à temperatura da água exceder a temperatura de saturação correspondente à pressão de vapor da água.

$$q_s = h (T_s - T_{sat}) = h \Delta T_e \quad [1]$$

Onde:

q_s é a taxa de transferência de energia;

T_s é a temperatura da superfície;

T_{sat} é a temperatura de saturação;

h é o coeficiente de transferência convectiva de calor.

A quantidade de calor absorvida no processo de evaporação d'água (calor latente = hfg) é muito alta em comparação com outros processos de transferência de calor comuns nas edificações. Segundo Rivero (1986) cada grama de água evaporada requer por volta de 2.450 J.

O ar, a uma temperatura determinada, pode conter somente certa quantidade de vapor de água. Quando se atinge este valor máximo, o ar está saturado. Se aumentar a massa de vapor no ar, desencadear-se-ia o processo inverso – a condensação, ou seja, o vapor excedente transforma-se para o estado líquido.

Portanto, o processo de evaporação da água está fortemente ligado às condições climáticas locais, ou seja, principalmente à umidade do ar. A Figura 10 ilustra a relação entre a temperatura de bulbo seco, (no eixo das abscissas), umidade relativa (linhas curvas do gráfico) e a umidade absoluta (ordenadas). Sabendo-se a temperatura do ar e a umidade relativa de um local, o eixo das ordenadas vai apontar a quantidade de água contida no ar em gramas de água por quilograma de ar seco.

Psicrom 1.0 - Carta Psicrométrica para Pb: 93,553 kPa (Altit: 668 m)

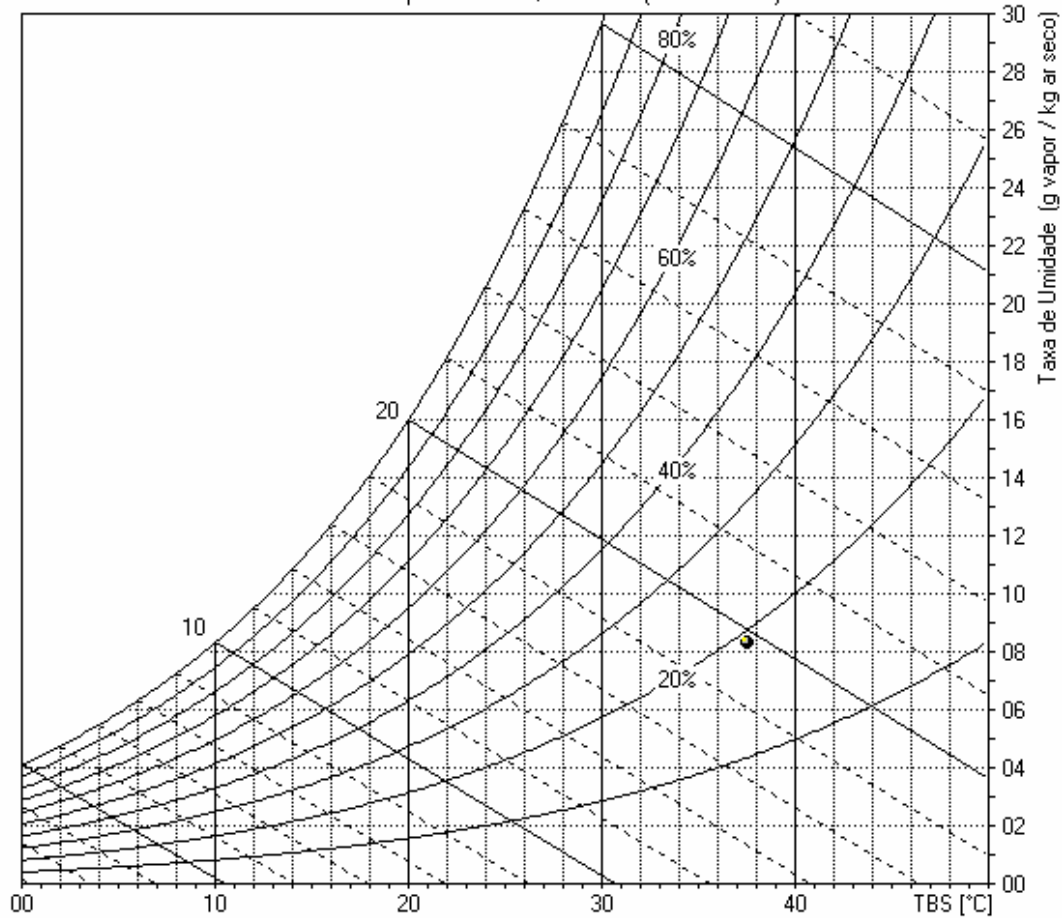


Figura 10 – Umidade do ar em função da temperatura do ar (TBS) e do ponto de saturação

Fonte: Roriz, 2003.

A técnica do resfriamento evaporativo tem sido testada em várias localidades, de diversas condições climáticas. Os tipos mais encontrados na literatura são:

- Estratificação térmica da cobertura através de tanques, bolsas ou colchões d'água;
- Aspersão d'água na cobertura.
- Torre de resfriamento no ambiente;

3.3.1.1 Estratificação Térmica na Cobertura Através de Tanques, Bolsas ou Colchões d'Água

Por algum tempo, coberturas foram resfriadas com compartimentos plásticos cheios d'água. Porém, com o advento do isolamento e aspersão d'água na cobertura, segundo Yellot (1961), apud Cook (2002), a aplicação desta técnica tornou-se mais rara, apesar da sua eficácia em reduzir a temperatura superficial da cobertura em dias de verão.

Mais tarde, Yellot, apud Tiwari et al (1982), realizou um experimento em Phoenix, Arizona, USA, durante o verão de 1965, para determinar quanto a aspersão em superfícies horizontais e inclinadas poderia resfriá-las sob condições de intensa insolação, alta temperatura atmosférica e baixa umidade relativa. Observou-se que nestas condições a aspersão poderia efetivamente resfriar superfícies horizontais e inclinadas. Usando-se 1,5kg de água aspergida, a temperatura da cobertura foi reduzida, porém não houve diferença na média de temperatura ao longo do dia, entre a superfície horizontal e a inclinada. Nas mesmas condições, ao longo do dia houve uma diferença para a cobertura seca, variando de -1,1° a 4,4°C. A aplicação da aspersão em coberturas mostrou-se eficaz em construções de baixa inércia térmica, com nenhum ou quase nenhum isolamento da cobertura.

O uso de tanques d'água na cobertura com isolamento térmico móvel foi proposto por Harold Hay em 1965 (apud Cook, 2002), providenciando aquecimento no inverno e resfriamento no verão (figura 11). Esta técnica foi patenteada como “Skyterm”, em 1971, pelo uso de “Thermoponds” na cobertura.

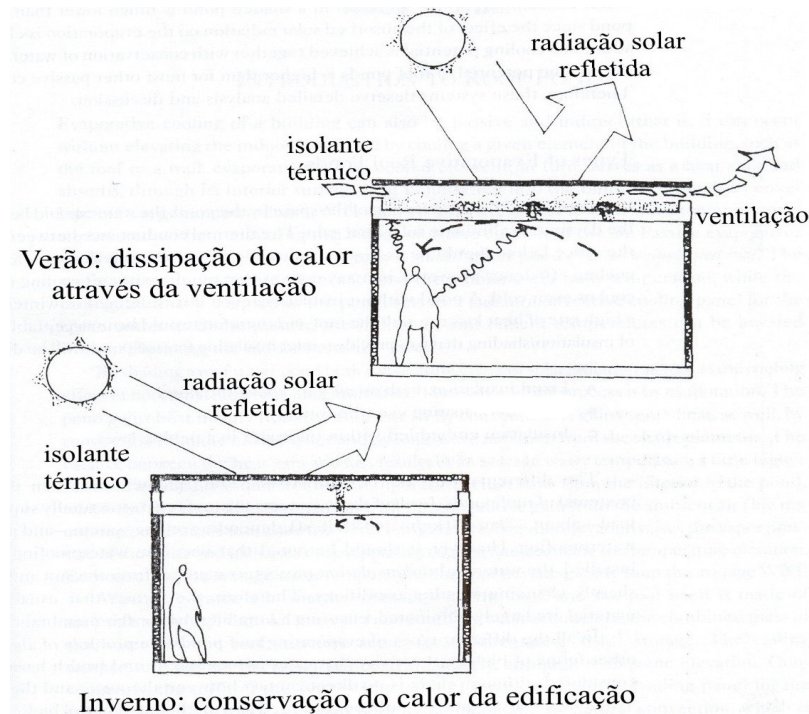


Figura 11 - Tanque d'água com painel isolante fixo na cobertura.

Fonte: Adaptado de Givoni, 1994b.

Várias técnicas foram instaladas e pesquisadas, baseadas nos princípios da perda de calor por convecção através da evaporação e conservação de água. Algumas com êxito, outras nem tanto, muitas com o apoio do DOE – Department of Energy dos EUA, e testadas em várias localidades. Pittinger e White, apud Cook (2002), inventaram o “Energy Roof” em 1977/78 no Arizona. Já o “Cool Pool” foi um sistema testado por Karen Crowther na Califórnia (Crowther e Melzer, 1979 (apud Cook, 2002)). O DOE, em parceria com uma indústria da Califórnia, testou um sistema de resfriamento da cobertura por gotejamento. Um sistema similar foi testado na década de 60 em Washington, DC, por Harry Thomason, mas com pouco sucesso.

Na zona árida da Índia, Nahar et al (1999) monitoraram cinco estruturas idênticas com técnicas passivas diferentes: pintura branca do telhado, isolante térmico na cobertura, tanque raso com isolante térmico móvel e úmido, colchão ou bolsa d'água. Segundo os autores, os resultados obtidos com a queda das temperaturas da cobertura e do ar interno

nas estruturas foram, em ordem crescente, respectivamente: isolante térmico do telhado, pintura, isolante móvel e resfriamento evaporativo (bolsas d'água). Concluiu-se que o tanque com isolante móvel acima da cobertura foi a melhor técnica de resfriamento das estruturas para melhorar as condições de conforto em regiões áridas. Mais tarde, os autores monitoraram mais técnicas passivas que serão comentadas na seção 3.3.4, Outros Sistemas Passivos de Resfriamento.

A técnica de expor tecidos pesados molhados flutuando, em painéis de poliestireno expandido e PVC, sobre tanques d'água foi comparada com outras várias técnicas de resfriamento passivo por Tang et al (2003) em Israel. Cinco outras técnicas foram monitoradas, porém não superaram os resultados da técnica inovadora. A eficiência da técnica deveu-se à criação de uma estratificação térmica na água do tanque, que obteve uma resistência térmica mais eficiente para a transferência de calor para o ambiente interno. Os resultados mostraram que a nova técnica obteve um desempenho um pouco melhor que o tanque com isolantes móveis.

Um método utilizando a estratificação térmica baseada no resfriamento evaporativo de um tanque d'água com bolsas ou colchões d'água na superfície auxiliou os autores, Tang e Etzion (2005), a desenvolver um modelo matemático para comparar o desempenho térmico deste com a técnica de tanque d'água com isolante térmico móvel sob condições do clima quente e seco. Os resultados mostraram que a técnica do colchão d'água obteve um desempenho um pouco melhor que a técnica com isolante móvel, considerada a mais eficiente do resfriamento evaporativo, exceto quando a edificação apresenta paredes e cobertura com baixa massa térmica e pouco isolante térmico.

No estudo de Tang e Etzion (2004) foi analisado o desempenho térmico da técnica de colchão d'água flutuando na superfície do tanque. A eficácia, deste tipo de técnica, depende muito do tipo de material de que é feita a cobertura abaixo do tanque. Foram feitas correlações empíricas e os resultados simulados apontam para uma cobertura de cerca de 20 cm de laje de concreto com cerca de 5 cm de deck de um material metálico.

O sistema de tanques d'água na cobertura, “RoofPonds”, acumulou resultados insatisfatórios como a proliferação de algas, larvas de mosquito, sujeira, limbo etc. Estes tipos de problemas também foram encontrados, muitos anos depois de instalado, no sistema de “Water Filled Plastic Bags”, composto por colchões ou bolsas d'água na cobertura.

3.3.1.2 Aspersão d'água na Cobertura

O uso de aspersores na cobertura minimizou as temperaturas decorrentes do ganho solar com a vantagem de possuir uma manutenção mais fácil. A Figura 12 ilustra uma das maneiras possíveis de aplicar os aspersores na cobertura com painéis isolantes térmicos.

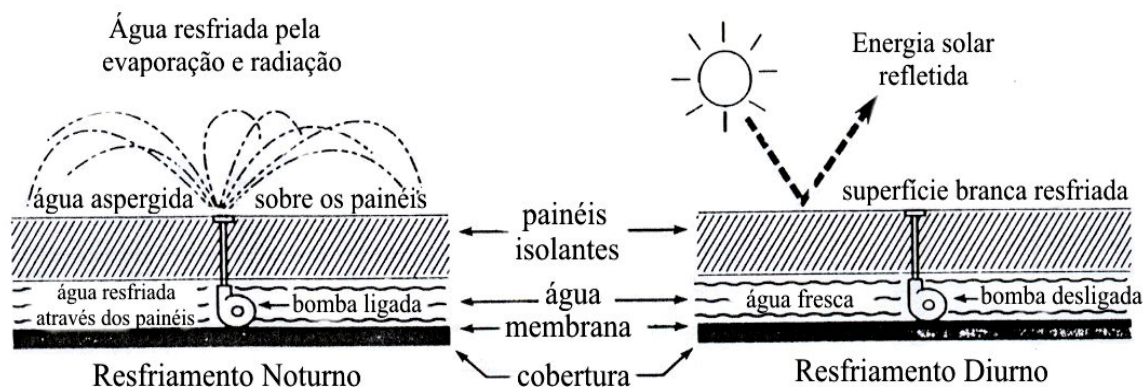


Figura 12 - Aspersores sobre painel isolante na cobertura.

Fonte: Adaptado de Givoni, 1994b.

Uma técnica, matematicamente simplificada, foi apresentada por Kondepudi (1993) que avalia preliminarmente os efeitos da aspersão d'água em cobertura, incorporando os efeitos do fluxo solar, temperatura do ambiente e umidade do ar muito mais facilmente do que previamente sugeria o modelo. Apresentou-se uma comparação entre as técnicas de tanque d'água com aspersão d'água, com variação entre elas da umidade relativa e da espessura do filme d'água, estudado na cobertura para as condições climáticas de Washington, DC. O autor concluiu que o resfriamento evaporativo teve um efeito benéfico na redução das cargas para resfriamento do edifício, porém o aumento da umidade relativa do ar diminuiu o efeito do resfriamento, devido à queda da taxa de evaporação. A resistência térmica do

filme d'água na cobertura não afetou significativamente a taxa do fluxo de calor e o tanque d'água provou ter a temperatura da cobertura mais estável que os aspersores.

Outro modelo matemático, para a diminuição da transferência de calor através de aspersores na cobertura, foi desenvolvido por Clements e Sherif (1998) na Flórida, USA. Segundo os autores, este sistema continua aumentando sua popularidade por um número de razões nos Estados Unidos. Foi implementado na década de 30 para a redução de custos em aplicações industriais. Atualmente é adotado como método que proporciona resfriamento sem a queima de combustíveis fósseis ou sem contribuir com os possíveis problemas de aquecimento global causado pela combustão e uso do gás CFC, base dos sistemas de refrigeração. Por isto, o objetivo do modelo foi predizer, com base nos dados climáticos e nas características térmicas da cobertura, o fluxo de calor, de acordo com o método da função de transferência (TFM – transfer function method), ou seja, o balanço de energia das superfícies externas e internas da cobertura, incluindo os processos de transferência de calor: evaporação, convecção, radiação e condução. Três tipos de coberturas foram testados: deck de gesso, deck de concreto sem isolamento térmico e deck de pinus sem isolamento térmico. As concordâncias entre os dados experimentais e as predições das cargas térmicas resultantes dos efeitos combinados dos aspersores mostraram um alto nível de confiança do uso combinado dos aspersores. O método da função de transferência resultou em boas predições e na manutenção da temperatura interna constante.

Cavalcanti (2001), em pesquisa realizada em Recife, Pernambuco, com resfriamentos: evaporativo, evaporativo-convectivo e radiante em cobertura de fibrocimento, concluiu que o resfriamento evaporativo nos dois primeiros processos é mais eficiente do que o resfriamento radiante (pintura branca da telha). O resfriamento evaporativo-convectivo mostrou resultados duas vezes melhores na diferença de temperaturas médias dos protótipos. Observa-se que o resfriamento evaporativo-convectivo, segundo o autor, consiste no processo de resfriamento por evaporação d'água na camada de ar mais próxima à cobertura. O ar, uma vez resfriado, resfria a telha pelo processo de convecção.

Os autores Ghosal et al (2003) validaram um modelo experimental para as condições climáticas de Nova Deli, Índia, durante o verão, coletando dados de uma estufa em três situações: sombreada e com fluxo de água; somente sombreada; e exposta ao sol.

Parâmetros estudados envolvendo efeitos do fluxo da água, extensão da cobertura, umidade relativa do ambiente e absorvância dos materiais de cobertura auxiliaram o modelo sobre o desempenho da temperatura do ar do ambiente da estufa. Verificaram-se que esta foi reduzida em 6°C e 2°C na estufa sombreada com fluxo de água e naquela com condições de sombreamento, respectivamente, em comparação com a não sombreada. Houve uma diminuição em 3°C na estufa sombreada e com o fluxo de água, enquanto aumentou em 4°C e 2°C na não sombreada e na sombreada, respectivamente. A percentagem do fluxo de massa de água otimizada foi de 0,25 kg/s para obter um resfriamento desejável dado pelo sombreamento e condições climáticas da estufa.

No estudo de Kant e Mullick (2003) foram coletados valores horários para a temperatura e a umidade do ar para cobertura exposta à radiação solar, no verão em Nova Deli (de abril a junho) e comparados com valores obtidos da cobertura não exposta ao resfriamento evaporativo. O processo de resfriamento adotado foi a partir da perda direta de calor sensível do ar. Para os meses de abril e maio, o resfriamento conseguiu atingir temperaturas internas confortáveis. Porém em junho, as condições do ar interno não atenderam a zona de conforto, implicando, porém, numa atenuação considerável do desconforto. Contudo, na escala de sensações térmicas desenvolvidas para o verão de clima tropical, as condições se mostram dentro da área de conforto. Para o ambiente em estudo, considerou-se que uma taxa de ventilação de 5 renovações por hora em abril, 10 em maio e 40 em junho foram suficientes para atingir níveis confortáveis.

Nascimento e Roriz (2005) monitoraram os efeitos da evaporação sobre as temperaturas superficiais internas de telhas cerâmicas, sujeitas às variações climáticas como vento e radiação solar. Uma telha foi mantida seca enquanto que a outra recebia o gotejamento de água sobre sua face externa em intervalos de 10min durante 6h. A evaporação provocou redução de até 18,67 °C na temperatura superficial interna da telha cerâmica no experimento de bancada.

Na cidade de São Carlos, Roriz e Roriz (2005) estão desenvolvendo um experimento sobre o uso de resfriamento evaporativo em bancadas com telhas cerâmicas. O sistema desenvolvido vai utilizar um dispositivo eletrônico chamado “Climus” para registros automáticos dos dados. O sistema será acionado toda vez que a temperatura de superfície

da cobertura ultrapassar determinado limite, sendo desligado quando um valor inferior ao limite for alcançado.

No trabalho de Silva et al (2005) foi estudado, através de simulação computacional, o desempenho do resfriamento evaporativo em edifícios condicionados com micro aspersão d'água, englobando as escalas de desempenho das gotas, do spray e do edifício. O desempenho do modelo na simulação da evaporação e do comportamento do edifício foi avaliado através de uma série de testes paramétricos. Os casos simulados demonstraram o quão complexo é o funcionamento do sistema de resfriamento evaporativo por microaspersão de água. As explorações paramétricas demonstraram que o modelo é suficientemente consistente e reage de maneira qualitativamente correta à variação dos parâmetros de entrada. O modelo possibilita: avaliar a viabilidade do sistema, diante dos riscos de umedecer objetos próximos aos aspersores, frente à penetração dos sprays; projetar o sistema de microaspersão para fins de resfriamento e/ou umidificação dos ambientes internos; mensurar o consumo de água e de energia do sistema a partir da pressão e da vazão de cada aspersor; além de analisar o custo-benefício da utilização do sistema.

3.3.1.3 Torre de Resfriamento no Ambiente

Em um estudo no Japão, Givoni (1998) testou o desempenho do “Shower Tower” como técnica de resfriamento para ambientes em edifícios. Esta técnica consiste numa torre com um tipo de chuveiro na extremidade superior. O fluxo de água, devido à altura, proporciona umidade ao ar e o seu resfriamento, respeitando-se alguns parâmetros mínimos de altura (figura 13).

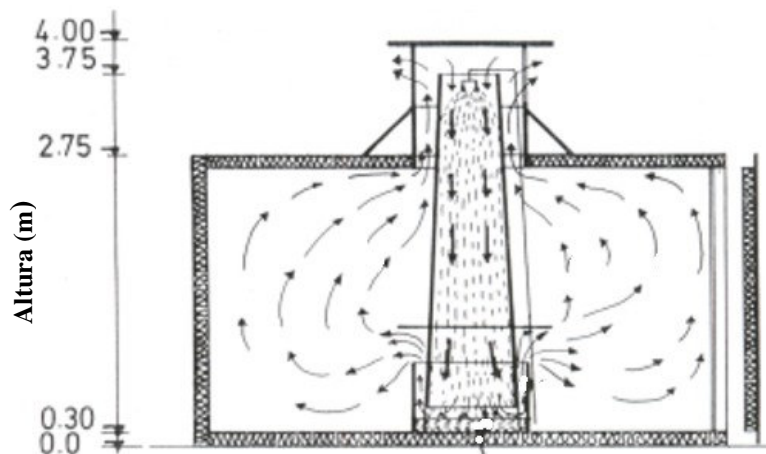


Figura 13 - Croqui da Torre de resfriamento “Shower Tower”.

Fonte: Adaptado de Givoni, 1994b.

A torre de resfriamento - “Shower Tower” - foi apresentada na EXPO’92 em Sevilha, Espanha, primeiramente para climatização de espaços externos. Givoni (1997c) testou esta técnica e comparou seu desempenho em três tipos de climas: temperado (Los Angeles, USA); quente e seco (Riyadh, Arábia Saudita); e, quente e úmido (Yokohama, Japão). Em geral, esse tipo de sistema funciona muito bem em climas quentes e secos, se o edifício portar uma massa térmica condizente com as características construtivas da região. Em Los Angeles, verificou-se desempenho semelhante do sistema utilizando-se tanto água doce quanto salgada, inferindo uma maior flexibilidade de sua aplicação. Segundo publicações do autor (Givoni e Yajima, 1997 e Givoni, 1998), este sistema pode resfriar a água através do fluxo de ar resfriado para o interior do edifício. Seu desempenho vai depender da altura e tipo dos “shower heads” (aberturas de saída da água), vazão de água e condições ambientais, funcionando também em climas quentes e úmidos, além dos quentes e secos.

Posteriormente, numa revisão moderna das torres de ventilação, a torre de resfriamento evaporativo foi utilizada por Badran (2003) para promover condições de conforto para os usuários de várias localidades da Jordânia. Concluiu-se que para as diversidades das características encontradas, a torre de resfriamento evaporativo necessitou de uma altura de 9m, diminuindo em 5m a altura da versão tradicional, para promover o resfriamento do ar durante a trajetória do fluxo de água. Este trabalho, quando comparado com o de Givoni

(1994b), deixa claro que a torre de resfriamento tem sua potencialidade para climas quentes e secos, desde que observada e testada a altura mínima para garantir a máxima eficácia do seu desempenho.

Na Itália, Manzan e Saro (2002) investigaram um sistema de resfriamento evaporativo através da circulação de ar por uma superfície molhada localizada abaixo do isolante térmico da cobertura. Uma análise numérica foi realizada para avaliar o sistema e as diferentes configurações obtidas. A configuração com chaminé solar e proteção para evitar o ganho solar apresentou melhor desempenho. Todavia, segundo os autores, os valores do fluxo de calor mostraram que a componente pode ser adequada para construções comerciais e industriais, onde a grande área de telhados viabiliza a técnica e onde os problemas de resfriamento são uma das grandes preocupações.

A pesquisa de Ghiabaklou (2003) estimou os níveis de sensações térmicas para uma edificação com sistema de resfriamento evaporativo pela queda d'água vertical, resfriando o ar do ambiente. Baseado na equação do voto médio estimado (VME) de Fanger (1970), os resultados mostraram que somente 5,4% estão acima do nível de satisfação +1. O VME foi afetado mais pela variação da temperatura do que por qualquer outra variável climática. No estudo, a taxa de umidade no nível confortável foi o dobro da área de superfície de água do sistema que proporcionou o aumento da umidade do ar interno.

3.3.2 Resfriamento Radiante

Resfriamento radiante é um fenômeno comum na superfície da Terra. De fato, é o único mecanismo pelo qual a Terra perde calor, pois o sol irradia energia à Terra na faixa de $1,5 \times 10^{19}$ kJ por dia e a temperatura média da superfície do planeta é aproximadamente constante por um número seguido de anos (Cook, 2002). É necessário, portanto, que uma quantidade de energia equivalente seja perdida por dia. Parte da energia que chega à superfície da Terra é refletida de volta para o espaço como luz visível e uma pequena fração é convertida em energia química pela fotossíntese. Mas, parte dela mais significativa, que aquece a superfície terrestre, é finalmente emitida para o espaço sob a forma de radiação infravermelha de onda longa, ou infravermelho termal.

A emissividade (ϵ) de uma superfície é a razão entre a radiação emitida pela mesma e a radiação emitida por um corpo negro ideal à mesma temperatura. Todos os materiais emitem calor na forma de radiação infravermelha. A intensidade da radiação R (W/m^2) emitida por um corpo depende da temperatura absoluta T (K) e da emissividade ϵ da superfície, de acordo com a equação:

$$R_{\text{emit}} = \sigma \epsilon T^4 \quad [2]$$

Onde $\sigma = 5.6686 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, é a constante de Stefan-Boltzmann.

Se a refletância de uma superfície para radiação de onda longa é muito alta, sua emissividade é próxima a zero ($\epsilon \approx 0$). Por exemplo, a emissividade de uma superfície metálica polida é aproximadamente $\epsilon \approx 0,05$. Muitos materiais de construção apresentam alta emissividade, $\epsilon \approx 0,9$, como a água, concreto, vidro, pintura, madeira e vegetação. A emissividade (ϵ) é diferente para cada material e depende da faixa de comprimentos de onda. Numa mesma faixa de comprimento de onda, a emissividade (ϵ) é aproximadamente igual à absorptância (α) da superfície de um material. Já a refletância (ρ), a absorptância (α) e a transmitância (τ) à radiação de onda curta (espectro solar) variam em função da cor, da transparência, refletividade e opacidade de suas superfícies. Assim a tabela a seguir (Tabela 3) apresenta valores da emissividade (ϵ) e absorptância (α_{OL}) de algumas superfícies na faixa do infravermelho longínquo (IV).

TABELA 3 – Comportamento dos corpos opacos em relação à energia radiante no infravermelho longínquo. Adaptado de Rivero, 1986.

ACABAMENTO SUPERFICIAL	EMISSIVIDADE (ϵ) e ABSORTÂNCIA (α_{OL}) AO IV
Superfície não metálica	0,95
Concreto	0,90
Pinturas betuminosas	0.95
Pintura com pigmentos metálicos (alumínio ou bronze)	0,40 - 0,60
Chapas de alumínio ou ferro galvanizado novas	0,20 - 0,30
Chapas de alumínio ou ferro galvanizado sujas	0,20 - 0,30
Chapas de fibrocimento novas	0,95
Chapas de fibrocimento sujas	0,95
Alumínio, cromo ou cobre polido.	0.04

A transferência de calor radiante entre uma superfície radiante e o céu pode ser descrita aproximando-se o comportamento da superfície ao do corpo negro ou corpo cinza. O fluxo líquido R_{liq} irradiado por uma superfície é dado por:

$$R_{liq} = \epsilon(\sigma T_{sup}^4 - R_{céu}) \quad [3]$$

$$R_{céu} = \sigma T_{céu}^4 \quad [4]$$

Onde:

ϵ é a emissividade da superfície

σ é a constante de Stefan-Boltzman, $\sigma = 5.6686 \times 10^{-8}$ em $\text{W/m}^2\text{C}^4$;

T_{sup} é a temperatura absoluta da superfície, em K

$R_{\text{céu}}$ é o fluxo total incidente sobre a superfície pelo céu, em W/m^2 ;

$T_{\text{céu}}^4$, em K, é definido como a temperatura de um corpo negro emitindo a mesma quantidade de radiação que o céu, de acordo com a equação 4.

É fato conhecido que o céu limpo de nuvens é uma fonte do resfriamento radiante. A emissão de radiação infravermelha vinda de nuvens é tão alta quanto aquela vinda do céu limpo, desde que as nuvens sejam claras e repletas de umidade.

O resfriamento radiante é um importante mecanismo de resfriamento natural que pode, sob certas circunstâncias, ser adaptado ao controle térmico das construções. O potencial de resfriamento é grande durante a noite, com céu limpo e em regiões com baixa umidade atmosférica. Envolve vários processos de transferência de calor: radiação de ondas longas pela superfície radiante; radiação emitida pela atmosfera e absorvida pela superfície radiante; troca de calor por convecção entre a superfície radiante e ar ambiente; transferência de energia da superfície radiante para o componente construtivo por condução, quando o telhado for laje de concreto, ou forçada pelo fluxo de ar no caso específico de telhados metálicos; troca de calor por convecção entre a superfície radiante e o ar do ático.

Baseado nestes princípios físicos, Givoni (1994b) aponta três tipos básicos de aplicação prática do resfriamento radiante:

- Cobertura de alta massa térmica e com isolamento móvel;
- Cobertura leve, geralmente metálica, com ventilação do ático;
- Água resfriada circulando em sistema fechado pela cobertura.

3.3.2.1 Alta Massa Térmica Com Isolamento Móvel

O sistema de resfriamento radiante por alta massa térmica pode ser aplicado em lajes de coberturas de concreto (figura 14a e b) ou superfície metálica coberta com bolsas ou colchão d'água (figura 15).

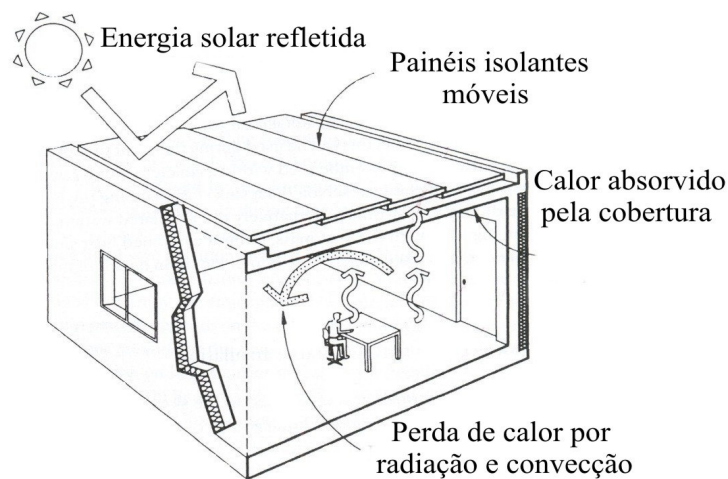


Figura 14a – Paineis isolantes protegem a cobertura da radiação solar.

Fonte: Adaptado de Givoni, 1994b

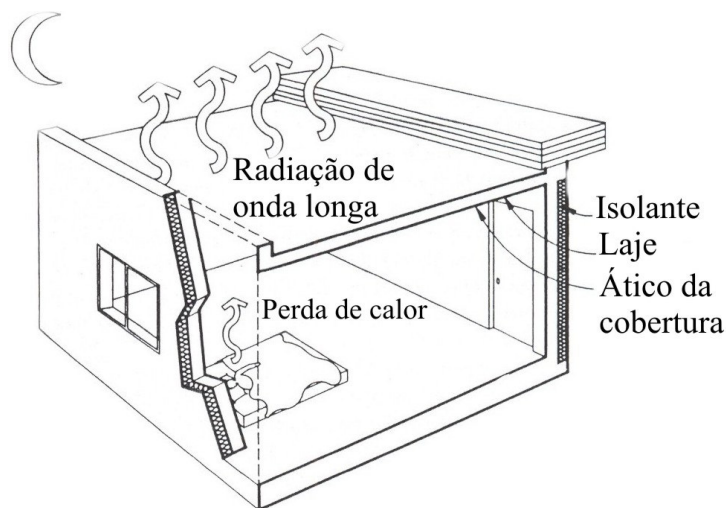


Figura 14b – Transferência de calor por radiação da cobertura durante a noite.

Fonte: Adaptado de Givoni, 1994b.

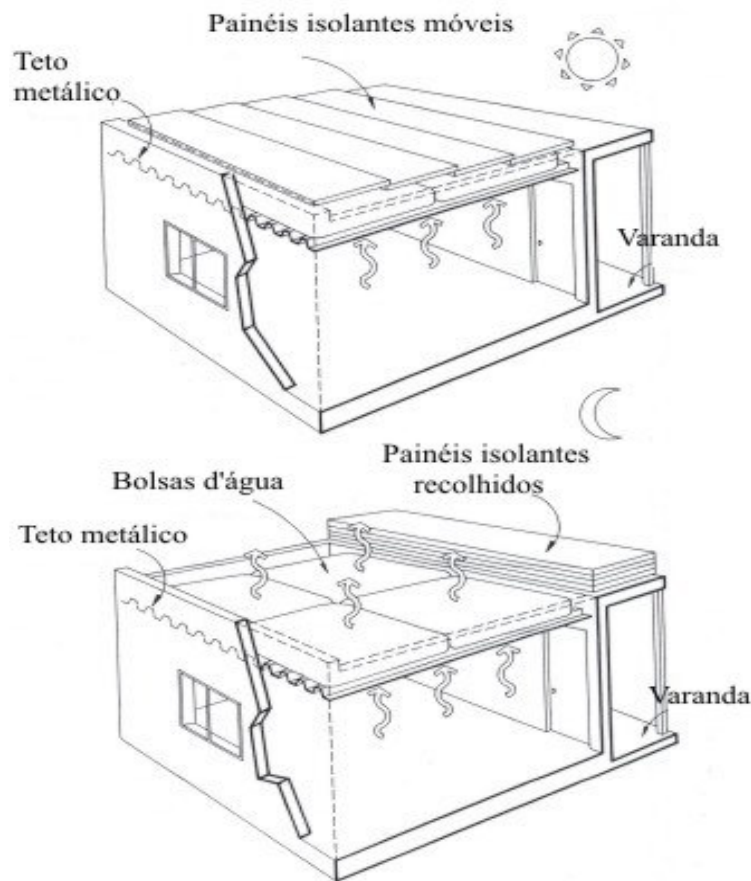


Figura 15 – Demonstração do sistema “Skyterm”: colchões ou bolsas plásticas d’água com isolamento térmico móvel.

Fonte: Adaptado de Givoni, 1994b.

Para servir como sistema de resfriamento, o telhado terá que ser isolado, por painéis móveis, da radiação direta do sol e de ambientes com altas temperaturas durante o dia, minimizando o ganho de calor do ambiente externo para o interior da edificação. À noite, seriam retirados os painéis móveis para que a cobertura irradie calor para o céu, resfriando a edificação por radiação e por convecção.

3.3.2.2 Cobertura Leve Com Ventilação do Ático

Na cobertura leve, especialmente a metálica, a maior parte da radiação incidente é refletida de volta para o ambiente, emitindo baixa radiação de onda longa para a construção. Se houver um ático ventilado embaixo dessa cobertura dissipando o calor e impedindo que ele seja absorvido pela construção, haverá um equilíbrio entre ganhos e perdas de calor do sistema (figura 16).

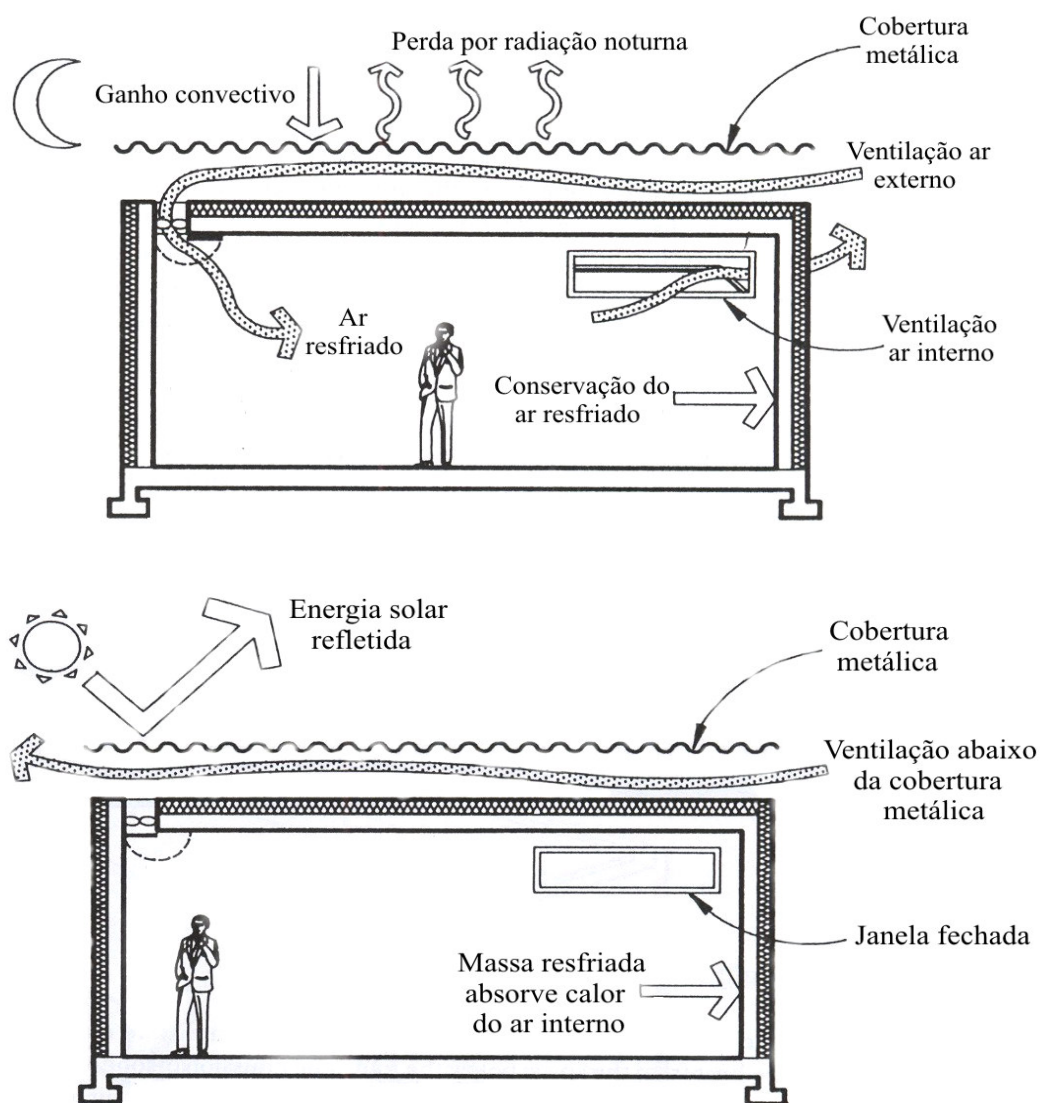


Figura 16 – Cobertura metálica com ático ventilado.

Fonte: Adaptado de Givoni, 1994b.

3.3.2.3 Água Resfriada Circulando Em Sistema Fechado Pela Cobertura

O sistema de água resfriada circulando em sistemas não transparentes acima ou no material de cobertura no período da noite, no verão, possibilita o resfriamento por condução e radiação, conforme ilustra a Figura 17.

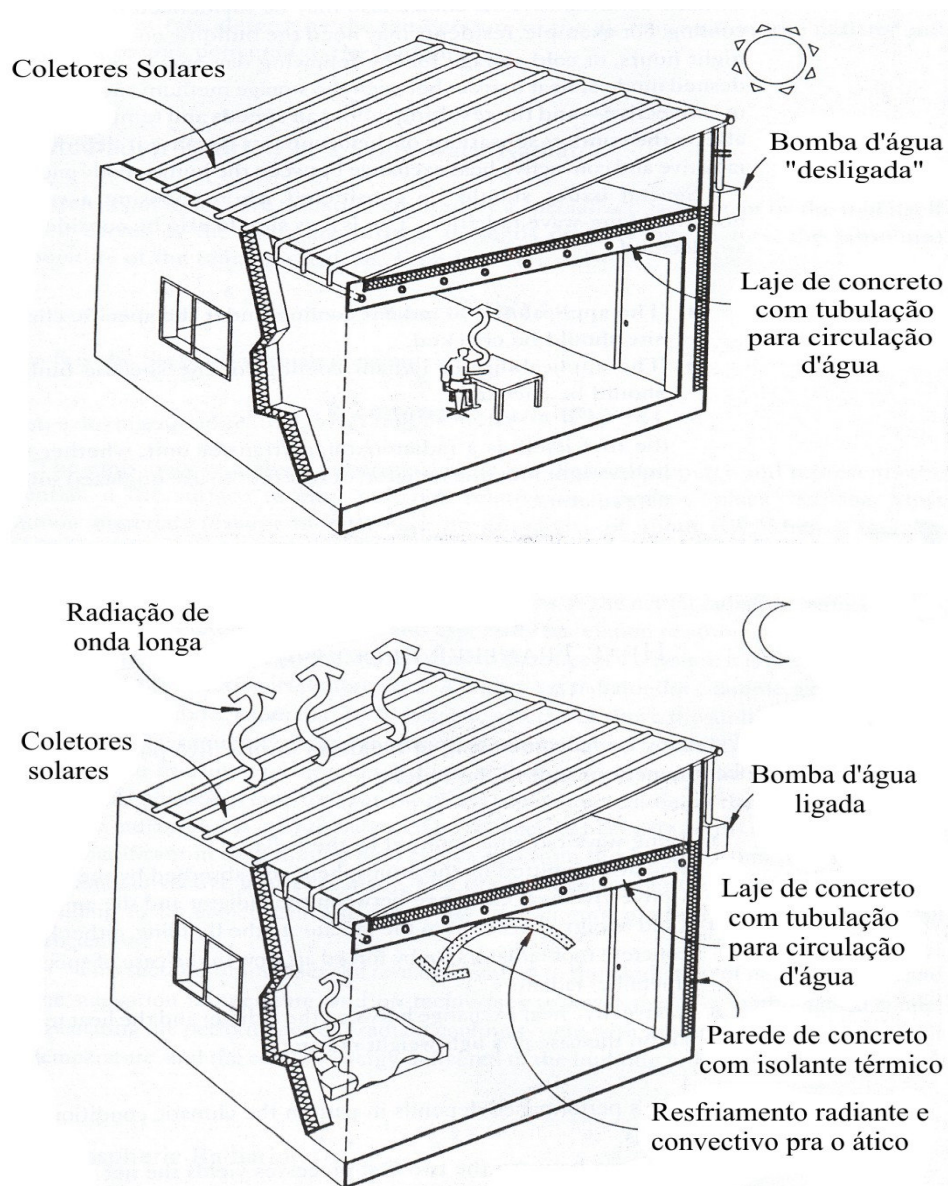


Figura 17 – Perda de calor por radiação durante o dia e a noite.

Fonte: Adaptado de Givoni, 1994b.

Já um tanque d'água circulável, acima da cobertura, foi desenvolvido e testado por Y. Etzion em 1989 (apud Cook, 2002) com sistema de fluxo d'água semelhante ao da Figura 18.

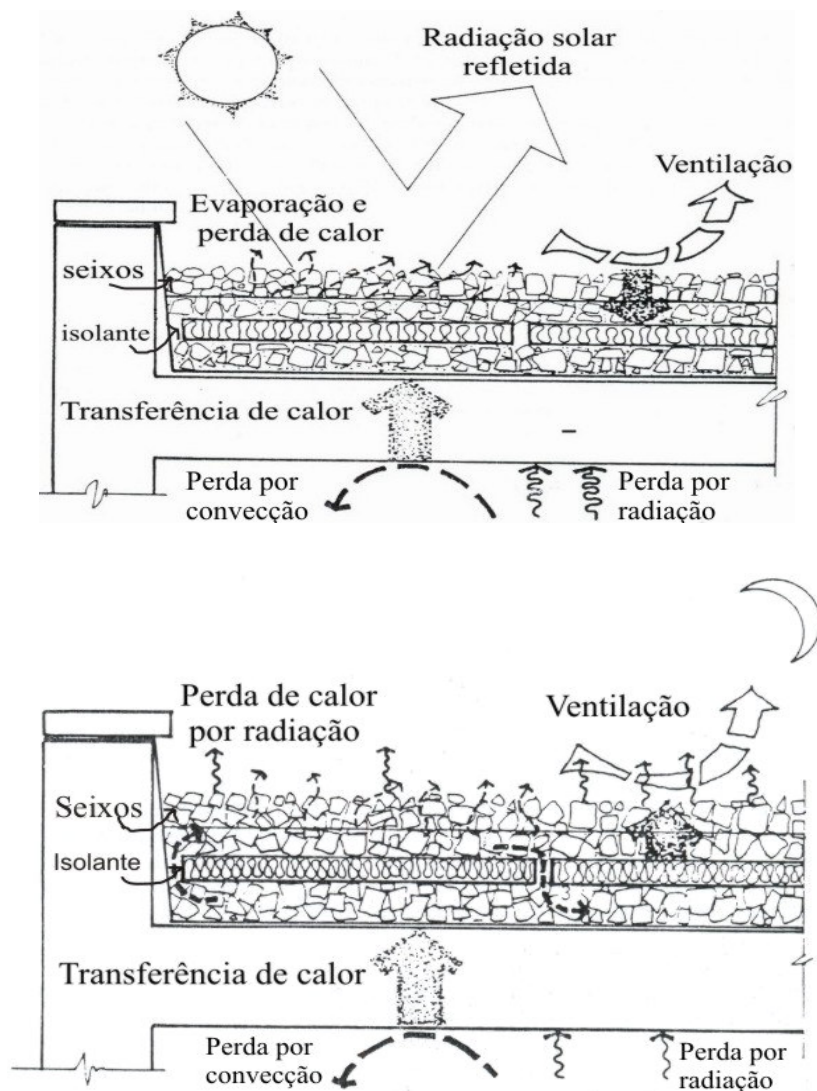


Figura 18 – Água circulando entre seixos na cobertura, diminui a temperatura superficial através da evaporação. Durante a noite, água circula entre os seixos e retira calor da cobertura.

Fonte: Adaptado de Givoni, 1994b.

O resfriamento radiante é estudado por vários pesquisadores de países com climas diferentes, tendo como meta reduzir os custos com o consumo de energia elétrica. Os usos

dos isolantes térmicos e tipos especiais de materiais construtivos têm aumentado significativamente em anos recentes, em climas frios e quentes. Isto se deve ao aumento da demanda por atender as sensações de conforto para pessoas em construções residenciais, comerciais e institucionais, aliado à necessidade de redução do consumo energético (legislação). As características térmicas das construções dependem das condições internas solicitadas, prevalecendo à ação das condições externas e a escolha certa de materiais construtivos e isolantes térmicos.

A pesquisa de Al-Sanea (2002) consiste em avaliar e comparar o desempenho térmico de elementos construtivos da cobertura, sujeita às mudanças periódicas de temperatura do ambiente, da radiação solar e trocas de energia radiante. O estudo foi realizado através de um modelo numérico, e aplicado para simulação e comparação das características térmicas de seis variantes da estrutura da cobertura usadas em construções da Arábia Saudita. Os resultados mostraram que, como esperado, a fonte dominante de ganho de calor pela cobertura é a absorção da radiação solar. Enquanto isto age desfavoravelmente no verão e favoravelmente no inverno; a troca de radiação com o céu e a transferência de calor por convecção agem exatamente da maneira oposta. Em geral, a contribuição das trocas por radiação foi maior que o dobro das trocas de calor por convecção. O autor concluiu que a inclusão da camada de isolante de 5 cm de poliestireno moldado pode reduzir a carga térmica de transferência pela cobertura em $\frac{1}{3}$ do valor da cobertura de referência sem isolante. Já o poliuretano pode reduzir em $\frac{1}{4}$ a carga térmica.

Tang et al (2004) desenvolveram um método simples para estimar a emissividade atmosférica do céu em noites claras. Baseado na variação da temperatura da água em tanque raso, através da percentagem da evaporação d'água no tanque para o ar do ambiente devido às trocas de energia radiante entre o tanque d'água e o céu, Calculou-se uma correlação empírica para os cálculos da emissividade do céu em Negev Highlands. Os resultados mostraram que a emissividade local é insignificamente menor que as previstas pelas correlações feitas por Berdahl e Clarck, apud Tang et al (2004). O método proposto é simples e elimina a calibração complicada do piranômetro, porém sua aplicação é restrita às condições climáticas locais.

A principal parte da relutância dos construtores e do público em geral para incorporar as características do resfriamento radiante em novas construções está na falta de familiaridade com os princípios e o potencial do processo em questão. Outros fatores, que impedem tal desenvolvimento, incluem a necessidade do uso de técnicas construtivas especiais e materiais, a exigência de painéis termo-isolantes deslizantes cobrindo o telhado para proporcionar bom desempenho térmico e ao fato do sistema de resfriamento radiante não estar ainda adaptado ao mercado de retrofit. Isto significa, na prática, que a construção deve ser projetada para o resfriamento radiante desde o início e medidas corretivas dificilmente poderão ser tomadas posteriormente.

Novos tipos de materiais poderiam acelerar a aceitação dos princípios do resfriamento radiante para construções, especialmente se estes conduzem ao desenvolvimento modular e a unidades comerciais que possam ser instaladas facilmente na cobertura.

3.3.3 Resfriamento Reflexivo

A seção anterior tratou da reflexão especular, ou seja, da radiação refletida por superfícies polidas. É fato que em superfícies opacas, na radiação em determinada região do espectro, não há transmissão de energia, apenas absorção e reflexão, representada pela fórmula a seguir:

$$\rho + \alpha = 1 \quad [5]$$

onde:

ρ é o coeficiente de reflexão, ou refletância do material, que varia entre 0 e 1;

α é o coeficiente de absorção, ou absorptância do material, que também varia entre 0 e 1

A refletância (ρ) é a propriedade que determina a fração da radiação incidente refletida por uma superfície, dependendo da direção da radiação incidente e da refletida. A reflexão difusa ocorre quando a radiação refletida independe da direção da radiação incidente. Nesse caso, a reflexão ocorre em diferentes ângulos com a normal da direção de incidência.

A absorptância (α) é a propriedade que determina a fração da radiação absorvida por uma superfície, e como a emissividade (ϵ), tem uma relação de dependência direcional, com a distribuição espectral e a natureza da superfície absorvedora.

Pela Lei de Kirchhoff, uma superfície emite radiação em proporção igual à absorvida se estiver na mesma temperatura de um corpo negro, logo:

$$1 - \epsilon = \rho \quad [6]$$

Onde:

ϵ é a emissividade da superfície;

ρ é a refletividade da superfície.

O albedo (α) de uma superfície é a razão entre a intensidade de radiação solar refletida pela mesma e a intensidade incidente. Assim, um objeto branco ideal, completamente refletor, tem um albedo igual a 1, enquanto que um objeto preto ideal, sem refletividade, tem um albedo igual 0 (zero) para determinadas faixas de comprimentos de onda (Tabela 4). Conhecendo-se a absorptância de uma superfície à radiação solar, o albedo é obtido através da equação 5.

TABELA 4 – Coeficiente de absorção de alguns corpos opacos. Adaptado de Rivero, 1986.

ACABAMENTO SUPERFICIAL	COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DIANTE DA RADIAÇÃO SOLAR
Superfície muito escura	0,85 – 0,98
Superfície material escura (tijolos)	0,65 – 0,80
Superfície material clara	0,25 – 0,50
Concreto	0,65 – 0,70
Pinturas betuminosas	0,85 – 0,98
Pintura com pigmento metálico	0,30 – 0,50
Chapa de alumínio ou ferro galvanizado nova	0,40 – 0,65
Chapa de alumínio ou ferro galvanizado suja	0,70 – 0,90
Chapa de fibrocimento nova	0,45 – 0,60
Chapa de fibrocimento suja	0,70 – 0,80
Alumínio, cromo ou cobre polidos	0,10 – 0,40

Recentemente, Prado e Ferreira (2005) fizeram um estudo sobre o albedo e a temperatura de superfície de vários materiais utilizados em coberturas. O trabalho discute, para a região do infravermelho, a baixa refletância como indicador de alta suscetibilidade de degradação

do material. A absorvância à radiação UV pode causar alterações na estrutura atômica de alguns materiais, causando efeitos como descoloração ou degradação dos materiais que seriam permanentes. Concluíram que a cobertura com alto albedo e baixa emissividade tem seu custo pago já no momento da instalação, reduzindo o uso de sistemas de refrigeração mecânica.

Modernas áreas urbanas geralmente têm superfícies escuras e pouca vegetação em sua volta. Isto se reflete nas alterações climáticas, no consumo de energia e na habitabilidade das cidades. Na escala do edifício, a exposição de superfícies externas escuras à radiação solar resulta no aumento da temperatura superficial externa e da carga térmica transferida para seu interior. Isto, conseqüentemente, aumenta a demanda do consumo de energia para o condicionamento de ambientes internos. Neste sentido, o trabalho de Rosenfeld et al (1995) traz sua contribuição com o monitoramento de residências em Sacramento e Flórida. Os resultados mostraram que 20 a 40% da energia direta são economizados com o aumento do albedo dos materiais construtivos. Através de simulação computacional, indicou-se que o efeito indireto da mudança em larga escala do albedo reverteu em quase o dobro da energia gasta.

Também Bretz e Akbari (1997) trabalharam com coberturas, investigando a alteração nos valores do albedo que alguns materiais sofreram expostos ao longo de um período à radiação solar. Trinta por cento do albedo são perdidos com os dois primeiros meses de exposição da cobertura (figura 19).

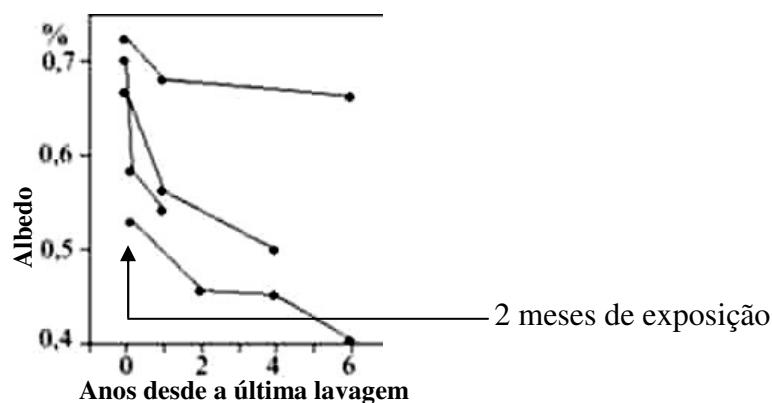


Figura 19 – Decréscimo do albedo em relação à exposição às intempéries.

Fonte: Adaptado de <http://eetd.lbl.gov/EA/Buildings/ RResearch/Albedo.html>.

Após o segundo ano, a degradação é menos intensa, podendo se reduzir em 20% nos anos subseqüentes. Concluíram que na cobertura com alto albedo, o envelhecimento não constitui uma barreira significativa na sua aplicação para reduzir os gastos energéticos. A mudança do albedo, em função do tempo, depende do tipo de acabamento da superfície de cobertura, sua textura, declive e proximidade de fontes de sujeira e entulhos. A estimativa de energia economizada com o resfriamento inclui os efeitos de redução do albedo. Em muitos casos, a limpeza da superfície de alto albedo retoma em 98 a 100% do valor estimado original do albedo.

Na Califórnia, USA, Akbari et al (1997) monitoraram coberturas com alto albedo de uma casa e duas escolas bangalôs em Sacramento. Foram coletados dados de ar condicionados, eletricidade, temperaturas do ar interno e externo, temperatura superficial do ático, cobertura e das paredes, além da radiação solar e velocidade e direção dos ventos. As construções foram simuladas no programa DOE-2.1 E, do Departament Of Energy dos EUA. Houve discrepâncias entre os resultados monitorados e os simulados devido aos valores de entrada do albedo. Não foi considerada a degradação das superfícies dos materiais, porém considerou-se a redução da energia empregada em resfriamento a partir de coberturas e paredes com alto albedo. Na residência, a energia economizada foi em torno de 2,2 kWh/d para a mudança do albedo de 0,18 para 0,73. O pico de demanda em refrigeração foi reduzido de 0,6kW para 0,2 kW. Comparando os dados das duas escolas, os resultados revelaram que a cobertura branca ($\alpha = 0.68$) usou 3% da energia para refrigeração utilizada por uma escola com cobertura metálica e paredes amarelas nas fachadas sudeste.

A energia empregada no condicionamento do ar para melhorar o conforto em climas quentes pode ser equiparada, por exemplo, a energia poupada com o uso de coberturas com materiais que refletiam a radiação solar. As informações quantitativas disponíveis sobre refletância solar de muitos materiais são insuficientes, tornando difícil para os projetistas escolher materiais mais apropriados. Neste sentido, Berdahl e Bretz (1997) fizeram um estudo da refletância solar de materiais no resfriamento da cobertura, analisando seu comportamento. Foram analisadas coberturas com tinta branca, membranas brancas, coberturas com pigmentados de alumínio, telhas asfálticas em diversas cores. Aferiram que

a refletância solar depende, além da escolha do material, da rugosidade e da presença de impurezas na superfície. Para se obter superfícies mais frias, segundo o autor, são desejáveis grandes valores de refletância solar, emitância térmica e coeficiente de convecção. Devido à grande variedade de materiais na construção civil, muitos dados de refletância solar não foram calculados até a data de publicação deste trabalho.

Bretz et al (1998) observaram o uso da refletância solar para diminuir o efeito das ilhas de calor. A pesquisa realizada em Sacramento, USA, mapeou a área urbana, indicando as superfícies escuras, médias e claras. As superfícies com alto potencial para modificação do albedo são as coberturas, responsáveis por 20%, e os pavimentos escuros, 10% da área monitorada. As telhas asfálticas, muito usadas nos Estados Unidos, mesmo em cores claras, são responsáveis por 75% da absorvância. Indica-se, neste caso, telhas de metal claras pois, apesar de terem um custo inicial alto, o investimento é recompensado pelos incentivos financeiros.

No trabalho de Rosenfeld et al (1998), a estratégia utilizada foi a adoção das “cool communities”, ou seja, recobrir e re-pavimentar com cores claras e inserção de árvores na cidade de Los Angeles. A análise indicou que foi reduzido em 3°C o fenômeno de ilhas de calor na cidade. Coberturas resfriadas, vegetação recobrindo superfícies, além das árvores chegaram a reduzir em 12 % o ozônio em excesso e tornaram a neblina mais suave. Este trabalho ilustra a contribuição da arquitetura bioclimática e a adoção de técnicas passivas no ambiente construído, possibilitando melhoras nas condições térmicas dos grandes centros urbanos. E conseqüentemente, poder-se-á melhorar as condições de conforto no interior das edificações.

3.3.4 Outros Sistemas Passivos de Resfriamento

Esta seção objetiva enriquecer a revisão bibliográfica sobre as várias técnicas de resfriamento passivo pesquisadas no mundo, além dos citados resfriamentos: evaporativo, radiante e reflexivo.

O uso da vegetação na cobertura também é conhecido como técnica passiva, fazendo-se uso da evaporação, através da transpiração das plantas, além da absorção da irradiação direta do

sol. Porém, esta é uma prática vernácula presente na história arquitetônica de muitos países como recurso para ocultar desníveis, construir terraços e belvederes.

A técnica foi pesquisada para atenuar o ganho térmico no interior da edificação por Wong et al (2003). Eles realizaram um estudo com vegetação na cobertura em clima tropical. Os três itens focados foram: redução da temperatura superficial causada por diferentes plantas, através do índice de área foliar ou Leaf Área Index (LAI); redução do ganho de calor causado pela vegetação; variação das variáveis ambientais causadas por plantas na cobertura. A pesquisa confirma que jardins em coberturas contribuem com benefícios térmicos, tanto para o edifício como para o ambiente próximo, ou seja, contribuem para baixar o consumo energético para climatização do ambiente e atenuar os efeitos das ilhas de calor no meio urbano. Ainda comparam os resultados de outros pesquisadores que utilizaram a mesma técnica, mas com objetivos diferentes. Entre outros, destacam-se Barrio (1998) e Eumorfopoulou (1998).

A pesquisadora Barrio (1998) explorou o comportamento térmico da vegetação em coberturas na Grécia. Através de uma análise matemática, sua principal conclusão foi sobre a vegetação agir como um mecanismo de isolante térmico antes de propiciar o resfriamento da cobertura.

Eumorfopoulou (1998) investigou o comportamento térmico da vegetação também na cobertura e concluiu que a vegetação pode contribuir para o desempenho térmico das construções, contudo não podendo substituir a camada de isolante térmico.

Os estudos com vegetação são limitados a determinados locais, climas e espécies de plantas, portanto os dados mensuráveis relacionados aos impactos térmicos da vegetação na cobertura devem ser investigados localmente.

O pesquisador Rjapaksha (2003) verificou a eficiência da ventilação do átrio como uma estratégia passiva de resfriamento em climas quentes e úmidos. Desenvolvida para o clima japonês, a estratégia incluiu o átrio no desenho do edifício, otimizando a ventilação natural e minimizando as altas temperaturas externas. Contudo, sua eficiência depende de detalhes do projeto da construção, como o tipo mais apropriado de saída de ar do átrio.

Em seus estudos, Givoni (1997b) monitorou edifícios com diferentes níveis de massas térmicas nos Estados Unidos, no verão de 1993, sob condições adversas de ventilação e cobertura. No primeiro momento foi observado o comportamento do edifício em relação à massa térmica e à ventilação noturna. Posteriormente, fez uma comparação da cor do revestimento do edifício com o monitoramento das temperaturas externas e internas. A ventilação noturna teve uma pequena contribuição em edifícios com baixa massa térmica na sua temperatura interna máxima. Contudo, verificou-se no primeiro estudo que as temperaturas máximas internas ficaram um pouco abaixo da temperatura máxima externa em edifícios de alta massa térmica.

Nahar et al (2003) aplicaram diferentes técnicas de resfriamento para a cobertura de protótipos testados em uma região árida da Índia. Nesta pesquisa foram sete técnicas aplicadas para atenuar o ganho de calor através da radiação solar na construção: pintura branca da cobertura, isolamento térmico com um material típico da região (Sania), resfriamento (radiante) noturno, resfriamento evaporativo, peças de cerâmica polida, câmara de ar como isolante e uma mistura de cimento e vermiculita aplicada sobre a cobertura. Dentre as técnicas citadas, o resfriamento evaporativo se mostrou mais eficiente, seguido da cerâmica polida. Considerando um telhado convencional e as condições locais, para promover resultados satisfatórios, seriam necessários cerca de 50 l/m² de água ao dia para promover o resfriamento evaporativo. Assim, a cerâmica sobre o telhado tem a potencialidade de reduzir consideravelmente a carga térmica do telhado, propiciando o resfriamento no interior das edificações quando não se dispõe de água em abundância.

Andreasi (2001) avaliou estratégias bioclimáticas para a Base de Estudos do Pantanal da Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul. O autor propôs as seguintes técnicas:

- Isolamento – utilização de placas de isopor sobre a laje para isolamento térmico;
- Sombreamento – proteção da radiação solar direta na janela com toldo plástico na cor branca;
- Ventilação – manter os ambientes internos permanentemente ventilados;

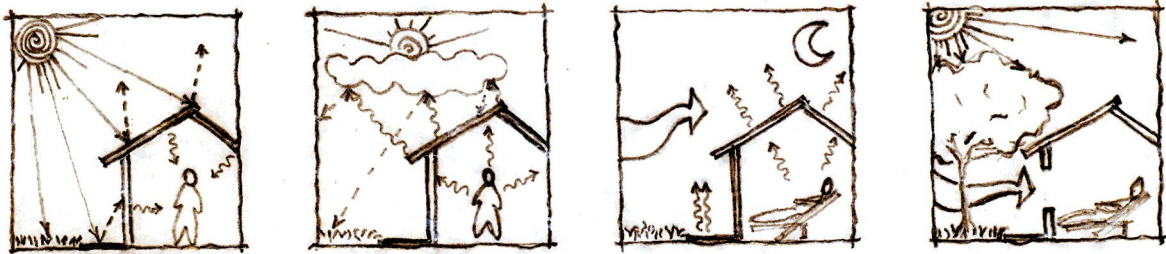
- Tijolo – uso da inércia térmica, adicionando tijolos maciços, assentados no sentido da menor dimensão, no perímetro do ambiente.

Dentre as situações monitoradas, a interação da Família e a estratégia Tijolo foram as que apresentaram temperaturas internas mais confortáveis. A denominação Família referencia o ambiente utilizado como moradia da família do zelador na unidade de pesquisa e que sofreu a interação dos seus ocupantes para atingir temperaturas mais amenas.

O trabalho do autor conclui este capítulo de revisão bibliográfica e ressalta a importância da interação humana para o bom desempenho térmico de técnicas passivas. Diferentemente do sistema de refrigeração mecânica, no sistema passivo, a percepção referente ao que ocorre externo ao edifício é fundamental. Assim, propicia que o usuário desempenhe sua atividade (trabalho, estudo, lazer) aliada às percepções temporal e sazonal.

Portanto, o projeto bioclimático deve garantir as exigências mínimas para a existência do ser vivo assim como seu bem estar. Ignorando modismos e a importação de estilos arquitetônicos, a arquitetura bioclimática vale-se por resgatar técnicas passivas de climatização natural do ambiente, contribuindo para minimizar a transferência de calor, incidente na superfície da cobertura, para o interior da construção. Conseqüentemente, diminuindo o uso de aparelhos de climatização, bem como o emprego incoerente de energia elétrica, porém proporcionando uma melhoria na qualidade de vida.

4. METODOLOGIA



Essa pesquisa tem como objetivo monitorar o comportamento de técnicas passivas em coberturas de fibrocimento, caracterizando-se segundo Gil (2002), por uma pesquisa de natureza experimental e descritiva.

Assim, na metodologia será descrito o monitoramento de células-teste em sistemas de resfriamento passivo, diferenciados pelos materiais e técnicas empregados e aplicados na superfície externa da cobertura. Os sistemas foram monitorados em função das variáveis climáticas locais como: temperatura, umidade, velocidade dos ventos, precipitação e radiação solar.

4.1 AMBIENTE DE ESTUDO

O objeto de estudo da pesquisa está inserido no clima da cidade de Campinas, mais precisamente, no distrito de Barão Geraldo, Campus da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – FEC, como ilustra a Figura 20. A cidade está a 22°53'20" de latitude sul e a 47°04'40" de longitude oeste, com uma altitude de 680m acima do nível do mar. Segundo as séries históricas de dados climáticos da região (período de 1998 a 2005), coletados pelo IAC (Instituto Agrônomo de Campinas), os meses mais quentes são janeiro e março com médias de temperaturas máximas entre 29,4°C e 29,7°C. O período mais frio compreende os meses de junho e julho com médias de temperaturas mínimas entre 13,3°C e 12,7°C, respectivamente. O período do verão abrange de novembro a março, e o período de inverno compreende os meses de julho a agosto. A umidade relativa do ar de dezembro a junho alcança 82,6% e 76,1% nos meses de julho a novembro. O período chuvoso inicia-se em dezembro e estende-se até março, sendo janeiro o mês mais chuvoso com 287 mm de precipitação.

cimento e pintados na cor branca (interna e externamente). As medidas internas correspondem a 2,00 x 2,50m². A cobertura é feita por laje pré-moldada (elementos cerâmicos e trilhos de concreto), com ático ventilado por aberturas na trama de tijolos de barro nos oitões das faces leste/oeste, e telhas de fibrocimento (figura 21). Essas telhas são fabricadas com cimento e fibras vegetais, estas últimas em substituição às fibras de amianto, ou seja, não contêm amianto.



Figura 21 – Vista nordeste das células-teste.

As células-teste estão orientadas com as fachadas de 2,70m a Norte e Sul e as de 2,20m a Leste e Oeste (figura 22).

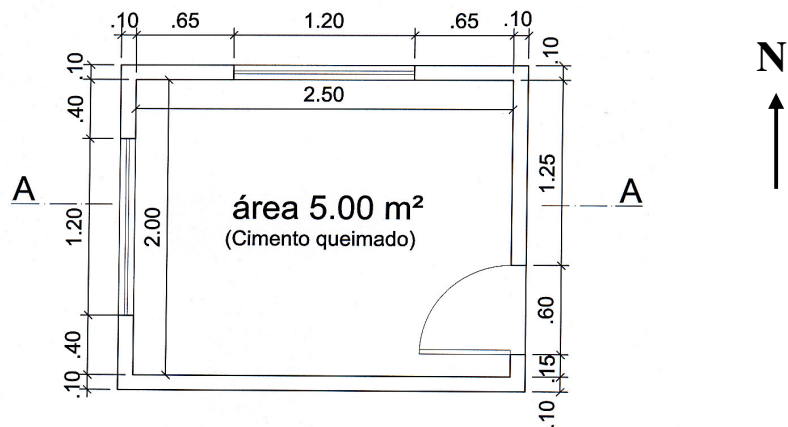


Figura 22 – Planta da célula-teste.

As aberturas (1,20 x 1,00m²) foram fechadas com painéis de madeira, pintados externamente de branco, e revestidos internamente com camadas de isopor, de modo que o conjunto tenha resistência térmica equivalente à da alvenaria. As portas de madeira (pintadas de branco) foram mantidas fechadas em todo o período de monitoramento. O ático possui aberturas feitas pelo assentamento dos tijolos nos oitões Norte-Sul. A inclinação da cobertura se dá na direção Leste (figura 23).

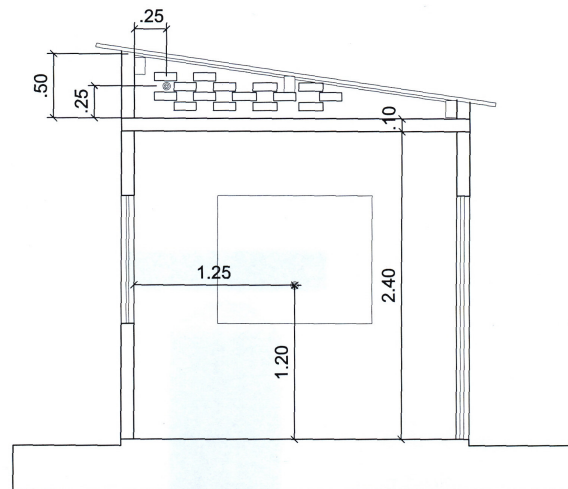


Figura 23 – Corte AA da célula-teste.

A Tabela 5 a seguir apresenta as propriedades térmicas dos materiais construtivos das células-teste. Há diferenças nos valores apresentados pelas referências, devido à

variabilidade regional das características das matérias-primas que fazem parte de muitos materiais construtivos.

TABELA 5: Propriedades térmicas dos materiais construtivos.

MATERIAL	ρ (kg/m³)	λ [W/ m°C]	c [kJ/(kg°C)]
Água	1000 ^a	0,62 ^a	4,19 ^a
Argamassa de assentamento	2000 ^a	1,15 ^a	1,00 ^a
Compensado de madeira	350 -550 ^a	0,12 – 0,15 ^a	2,30 ^a
Concreto de pedra britada	2200 ^a	1,90 ^a	1,00 ^a
	2200 a 2400 ^b	1,75 ^b	1,00 ^b
Fibrocimento em chapas	1900 ^a	0,76 ^a	0,84 ^a
Lâmina alumínio polido $\varepsilon < 0,2$	2700 ^b	230 ^b	0,88 ^b
Tijolo maciço prensado	1600 ^a	1,00 ^a	0,92 ^a

Fonte: ^a Rivero, 1986; ^b ABNT, 2005.

O critério de seleção das técnicas passivas foi, para cada uma, a apresentação de características exequíveis no Campus, viabilizando a realização da pesquisa. As técnicas escolhidas para aplicação nas telhas de fibrocimento da cobertura das células-teste estão entre aquelas apontadas pela ABNT (2005) e pela literatura revisada:

- Resfriamento evaporativo: aspersão d'água na cobertura.
- Resfriamento radiante: aplicação de filme adesivo de alumínio sobre a cobertura;
- Resfriamento reflexivo: pintura na cor branca.

A quarta célula-teste foi utilizada como referência, possuindo as características construtivas e de acabamento idênticas às demais células.

4.3 MÉTODOS

No terreno, onde estão localizadas as células-teste, há uma estação meteorológica para coleta de dados. Esta estação é da marca Campbell Scientific e monitora as seguintes variáveis meteorológicas:

- Temperatura do ar
- Umidade relativa do ar
- Direção dos ventos predominantes
- Velocidade do vento
- Radiação solar incidente
- Índice pluviométrico

A estação é composta por (figura 24):

- 1 “Data Logger CR 10x Measurement and control system” (com bateria, cabo conector, módulo de memória e teclado);
- 1 sensor de temperatura (-34 a 50°C) e umidade relativa do ar (0 a 90%);
- Piranômetro LI200x para monitorar a radiação solar;
- Conjunto 03001 (wind sentry) com anemômetro (velocidade de 0 a 60m/s) e sensor direção do vento;
- TB4 - L pluviômetro (rain gage) para monitorar a pluviosidade;
- 1 painel solar para suprimento de energia da bateria do data-logger CR10x.
- 1 bateria recarregável de 12 V (PS12 LA) – reguladores de voltagem, filtros e proteção contra queda de raios;

- 1 abrigo meteorológico para sensor de temperatura e umidade relativa, não aspirado, RMYoung.



Figura 24 – Estação meteorológica de aquisição de dados.

O sistema de aquisição de dados referentes ao desempenho térmico das células-teste é composto de duas unidades básicas: um datalogger CR10x e um multiplexador AM416, com 32 canais de aquisição de dados, que fazem a coleta automática e o armazenamento dos dados registrados pelo sistema de aquisição, que coleta os dados de temperaturas monitoradas nas células-teste.

As medições de temperaturas internas são feitas com termopares, do tipo T (cobre - constantan), 24 awg, ANSI (padrão americano), conectados ao multiplexador AM 416 (multiplexador é um aparelho que tem diversas entradas e uma saída, e efetua um roteamento dos dados de saída conforme a configuração do intervalo de aquisição de dados).

O software utilizado para entrada dos dados no computador (via cabo conector), é o PC 208W Campbell Scientific.

Os registros são feitos pela estação a cada 30 segundos, com totalizações a cada 10 minutos. A coleta dos dados é feita através do sistema automático CR10X, em programa Microsoft *Excel for Windows*.

4.4 VARIÁVEIS MANIPULADAS

A fim de distinguir as variáveis meteorológicas coletadas pela estação e as variáveis monitoradas nas células-teste, define-se como variáveis manipuladas as temperaturas (de superfície dos elementos construtivos e do ar) coletadas pelos termopares em regiões específicas das células-teste como ilustra a Figura 25:

- Temperatura superficial interna da telha;
- Temperatura do ar no ático;
- Temperaturas superficiais da laje: faces voltadas para o ático e para o interior da célula-teste;
- Temperatura interna do ar na célula-teste.

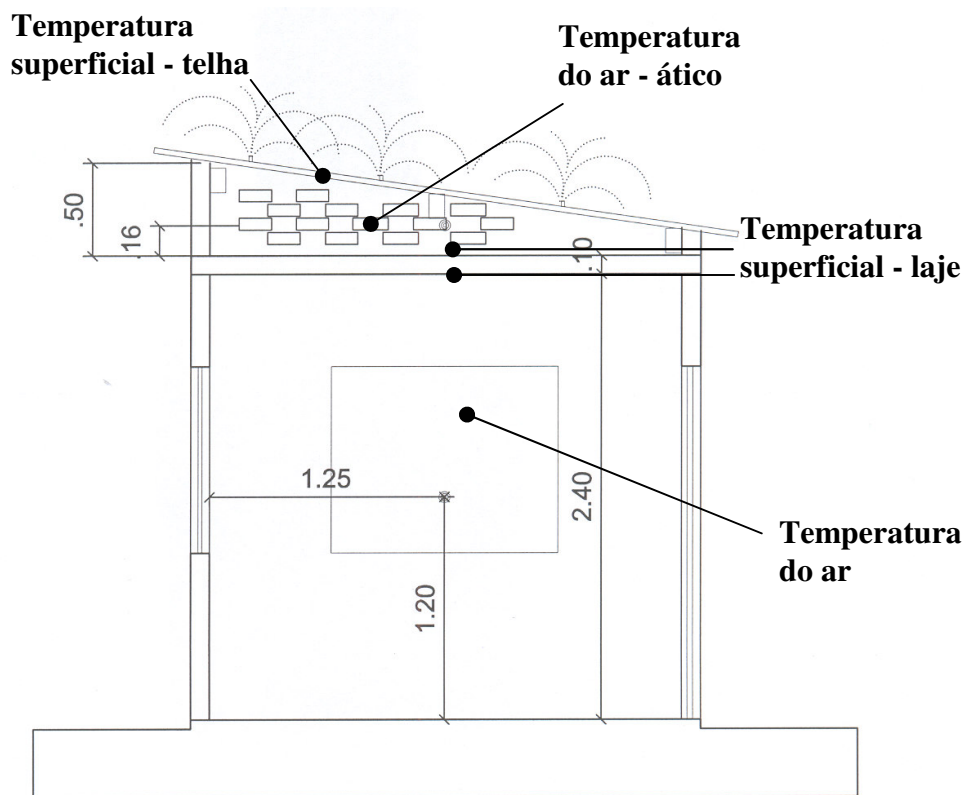


Figura 25 – Posicionamento dos termopares nas células-teste.

4.5 SISTEMAS

Foram monitorados três sistemas de resfriamento passivo, no período de 20 de janeiro a 10 de fevereiro de 2006. Desconsiderou-se o primeiro e último dia para efeito de estabilização dos equipamentos:

- Sistema de resfriamento evaporativo;
- Sistema de resfriamento radiante;
- Sistema de resfriamento reflexivo.

Nas quatro células-teste, três com os sistemas de resfriamento e mais a célula de referência (figura 26), foram instalados sensores (termopares) de monitoramento da temperatura como ilustrou a Figura 25.



Figura 26 – Vista das quatro células-teste: ao fundo: à esquerda a célula de referência e à direita o sistema evaporativo. A frente: à esquerda o sistema radiante e à direita o sistema reflexivo.

4.5.1 Sistema de Resfriamento Evaporativo

Aplicou-se o sistema de resfriamento evaporativo através de três micro-aspersores de jardim, instalados em uma tubulação de PVC sobre a cobertura (figura 27).

Os distanciamentos entre os micro-aspersores foram anteriormente testados e verificados de acordo com o diâmetro de abrangência da aspersão em função da inclinação da cobertura.

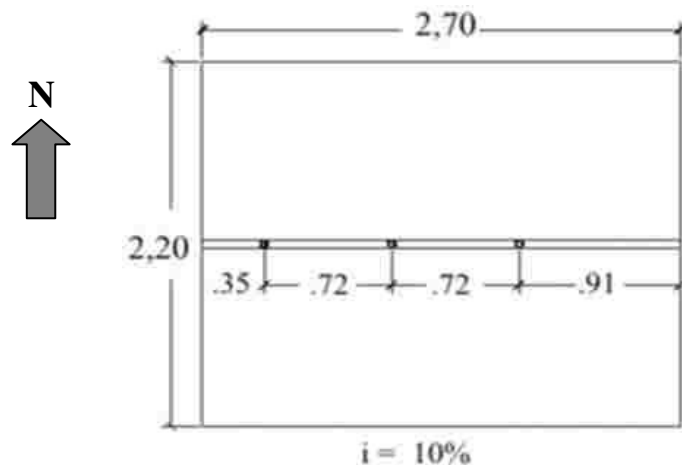


Figura 27 – Croqui do posicionamento dos três aspersores na cobertura. Inclinação no sentido Oeste-Leste.

O sistema de alimentação do resfriamento evaporativo é composto pelos itens relacionados a seguir, sendo que somente os aspersores ficaram externos à célula-teste (figura 28a e b):

- Caixa d'água de 200 litros com tampa – armazenar água;
- Bomba d'água de ½ CV – bombear água para a cobertura;
- Timer analógico – programação dos ciclos de aspersão;
- Hidrômetro analógico – registro do volume d'água utilizado;
- Micro aspersores de jardim – aspersão d'água na cobertura.

O hidrômetro utilizado fez o registro do volume de água que alimentava o sistema. Já o timer comercialmente disponível possui programação com variação pré-estabelecida: de 15 em 15 minutos, assim os ciclos de aspersão e o intervalo entre eles foram estabelecidos em pré-teste, baseados nesta razão.



Figura 28a – Vista leste de duas células-teste: a de Referência e com o Resfriamento Evaporativo.

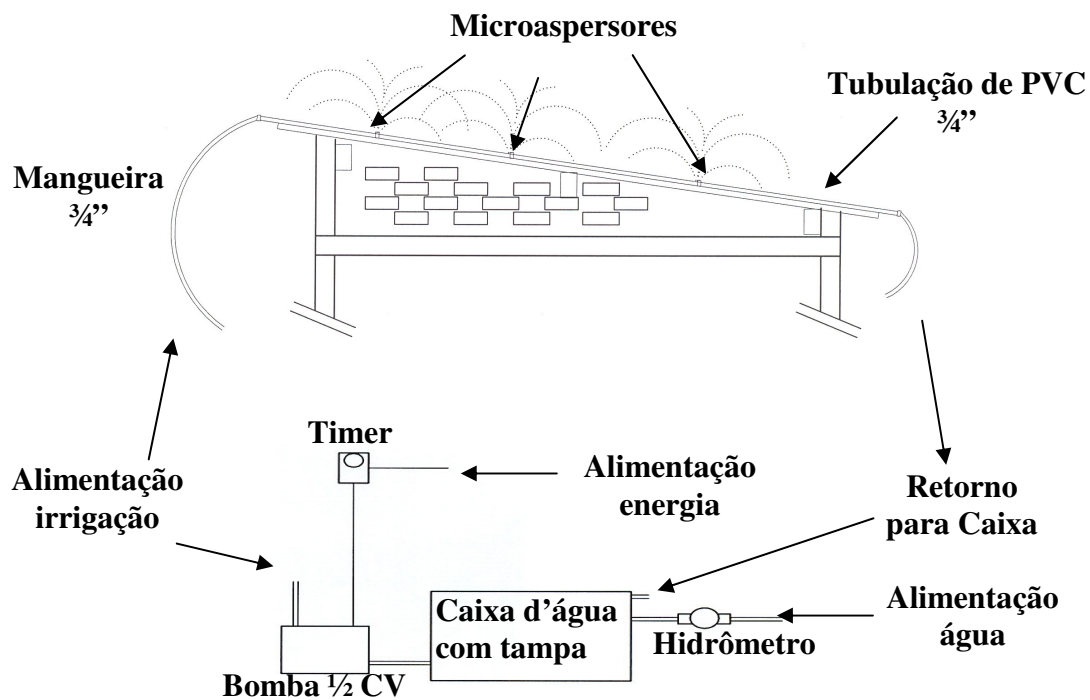


Figura 28b – Croqui esquemático da alimenta  o do resfriamento evaporativo.

Este sistema consistiu em aspergir água na cobertura através dos três micro-aspersores de jardim alimentados pelo sistema hidráulico instalado (figura 29).



Figura 29 – Vista do funcionamento dos aspersores na cobertura.

A função do timer utilizado foi proporcionar o acionamento do sistema de forma automática e programável. No período monitorado foram aplicados três programas de aspersão:

- Aspersão por 30 min, com intervalo de 30 min – de 21 a 25 de janeiro, com acionamento às 8h e desligamento às 20h;
- Aspersão direta – de 26 a 30 de janeiro, com acionamento às 10h e desligamento às 20h;
- Aspersão por 30 min, com intervalo de 1h e 30 min – de 31 de janeiro a 9 de fevereiro, com acionamento às 10h e desligamento às 20h.

4.5.2 Sistema de Resfriamento Radiante

Neste sistema, instalou-se o filme adesivo de alumínio – RCF (Radiant Energy Control Films), sobre a cobertura da célula-teste (figura 30).



Figura 30 – Aplicação do filme de alumínio na telha.

O filme de alumínio utilizado possui largura de 1m e espessura de 100 μ m ($1\ \mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$), e é produzido com tecnologia RCF, da empresa Vacuoflex, instalada no Centro Tecnológico da Unicamp. Esta tecnologia concentra numa face do filme deposições a vácuo de alumínio em filmes plásticos finos, com emissividade (ϵ) da ordem de 0,05.

4.5.3 Sistema de Resfriamento Reflexivo

Este sistema utilizou a propriedade de alta reflexão da radiação solar direta em superfícies claras. A cobertura desta célula-teste foi tratada com pintura na cor branca, com seis meses de exposição às intempéries locais. (figura 31). Para o mesmo período, 21 de janeiro a 9 de fevereiro, monitoraram-se as variáveis já descritas anteriormente.



Figura 31 – Telha com aplicação da pintura na cor branca.

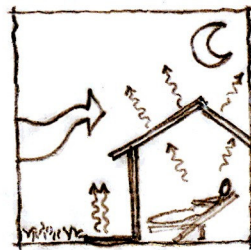
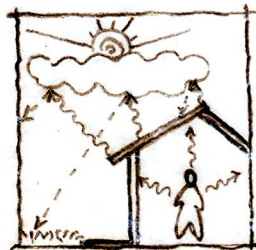
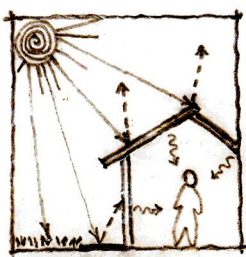
Todos os dados obtidos no período, tanto das quatro células-teste como das variáveis meteorológicas, foram armazenadas em planilhas para posterior aplicação de tratamento estatístico dos resultados, os quais serão elucidados no próximo capítulo, cujo objeto é a apresentação dos resultados.

4.6 TRATAMENTO DOS DADOS

Segundo Moreira (1982), esta coleta de dados se caracteriza por ser direta e ocasional, exigindo uma aferição detalhada dos dados coletados da pesquisa experimental. Os dados foram tratados através de modelos de análise estatística: Análise de Variância (ANOVA), Análise de Regressão Linear Múltipla (RLM) e teste de Tukey.

Os resultados e comentários são apresentados no próximo capítulo.

5. RESULTADOS



Conforme apresentado na metodologia, os dados coletados foram avaliados estatisticamente, estruturando este capítulo em quatro seções:

- Apresentação da Análise de Variância (ANOVA) para as variáveis monitoradas: temperaturas das superfícies internas das telhas (TT's), temperaturas do ar dos áticos (TAA's), temperaturas de superfícies das lajes voltadas para o ático (TLA's), temperaturas de superfícies de lajes voltadas para as células (TLC's) e temperaturas do ar interno das células-teste (TAC's) para cada sistema passivo;
- Apresentação da Análise de Variância (ANOVA) para os três períodos monitorados;
- Apresentação da Análise de Variância (ANOVA) para as variáveis meteorológicas;
- Apresentação da Análise de Regressão Linear Múltipla (RLM) para os três períodos monitorados.

5.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) E TESTE DE TUKEY DAS VARIÁVEIS MONITORADAS NOS TRÊS PERÍODOS

A seguir são apresentados os gráficos com as médias das temperaturas das superfícies internas das telhas (TT's), das temperaturas do ar dos áticos (TAA's), das temperaturas de superfícies das lajes para o ático e para a célula (TLA's), (TLC's) e das temperaturas do ar das células-teste (TAC's) para os três períodos monitorados.

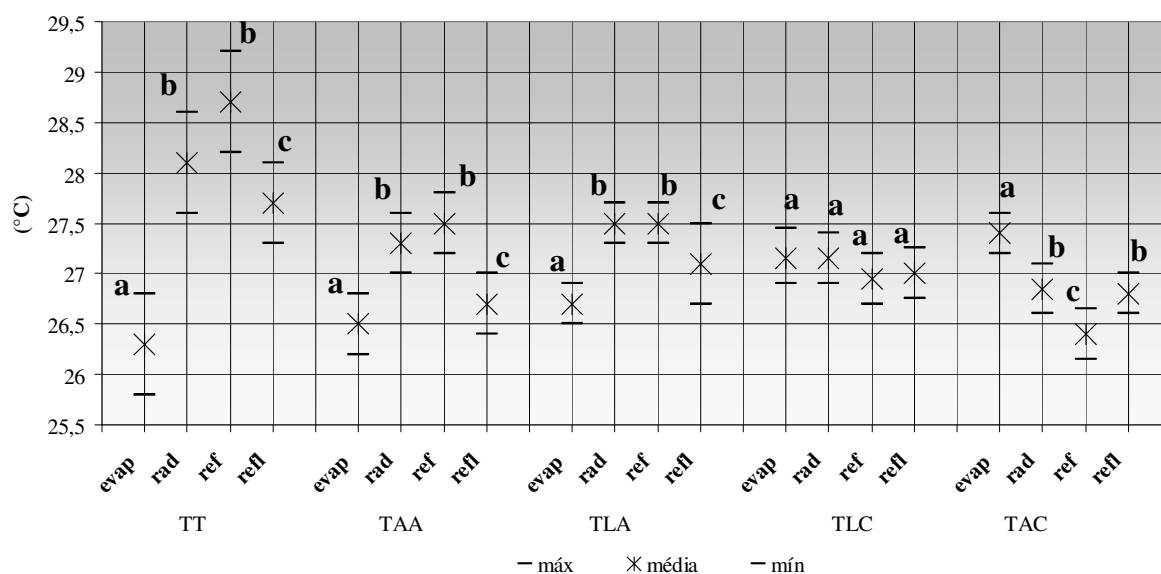
Segundo Morettin (1999), o modelo de análise de variância (ANOVA) é utilizado para explicitar a estrutura dos sistemas em monitoramento. Este modelo considera o grau de dispersão das variáveis manipuladas, em torno das médias de temperatura na distribuição com significância de 95% ($\alpha = 0,05$).

Na ANOVA aplicada para os três períodos monitorados, para o nível de confiança de 95%, todas as variáveis obtiveram $p < 0,05$, a exceção de duas: TLA (2º período) e TLC (1º período), que serão comentadas com o Teste de Tukey.

A comparação entre as médias das temperaturas monitoradas pode ser avaliada através das Figuras 32 a 34 e 35 a 39, que apresentam o teste de comparação de médias obtido através do Teste de Tukey, com significância de 95% ($\alpha = 0,05$).

5.1.1 Primeiro período: Aspersão por 30min/intervalo de 30min - 21 a 25 de janeiro de 2006.

A comparação das variações das médias das temperaturas em função das superfícies de cobertura estudadas é apresentada na Figura 32 com o Teste de Tukey para o nível de confiança de 95% ($p < 0,05$).



Letras diferentes para uma mesma variável monitorada (TT, TAA, TLA, TLC e TAC) diferem significativamente ($p < 0,05$) entre si (sistemas passivos aplicados) pelo Teste de Tukey.

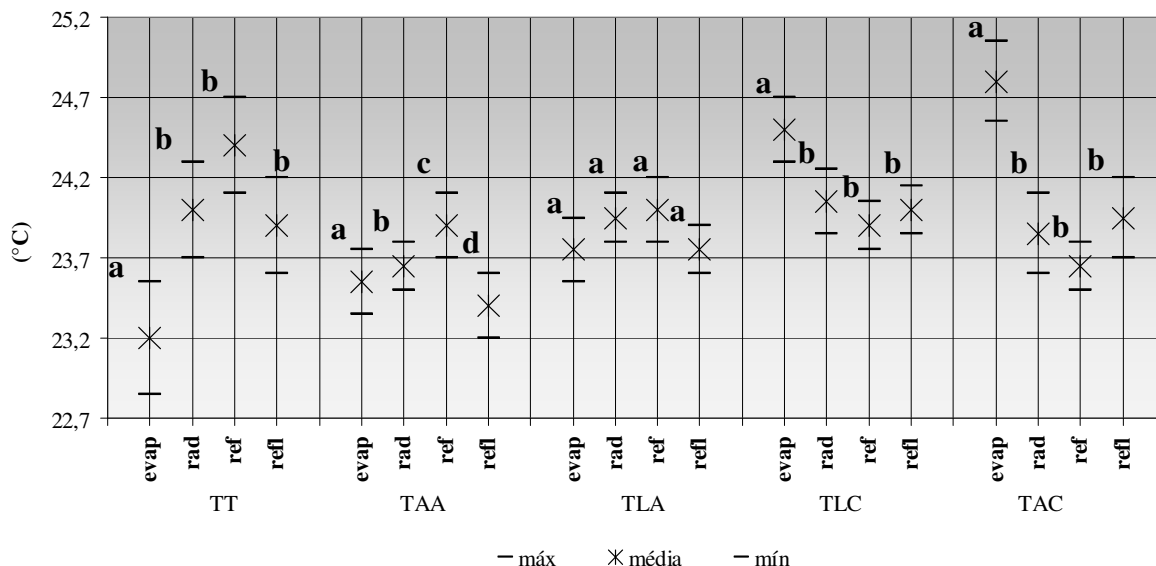
Figura 32: Teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para 1º período monitorado de 21 a 25 de jan/2006 (aspersão de 30min, intervalo de 30min).

Verifica-se a partir da Figura 32 que a temperatura de superfície interna da telha do sistema evaporativo ($TT_{evap} = 26,3$ °C) difere significativamente das temperaturas dos demais sistemas passivos ($TT_{rad} = 28,1$ °C, $TT_{ref} = 28,7$ °C e $TT_{refl} = 27,7$ °C). O sistema radiante (TT_{rad}) não difere da célula-teste de referência (TT_{ref}) e difere pouco do sistema reflexivo (TT_{refl}). O comportamento se repete para a temperatura do ar do ático (TAA) conforme indicação da legenda da figura 32 ($TAA_{evap} = 26,5$ °C, $TAA_{rad} = 27,3$ °C, $TAA_{ref} = 27,5$ °C e $TAA_{refl} = 26,7$ °C). Para as temperaturas de superfícies de lajes voltada para as células (TLC's), os sistemas não diferem entre si ($TLC_{evap} = 27,1$ °C, $TLC_{rad} = 27,1$ °C e

TLCref = 26,9°C) e entre a referência (TLCref = 27°C), comprovando o valor de $p > 0,05$ encontrado na ANOVA ($p = 0,4$).

5.1.2 Segundo período: Aspersão contínua - de 26 a 30 de janeiro de 2006.

A variação da temperatura em função das variáveis manipuladas (temperaturas) é apresentada na Figura 33.



Letras diferentes para uma mesma variável monitorada (TT, TAA, TLA, TLC e TAC) diferem significativamente ($p < 0,05$) entre si (sistemas passivos aplicados) pelo Teste de Tukey.

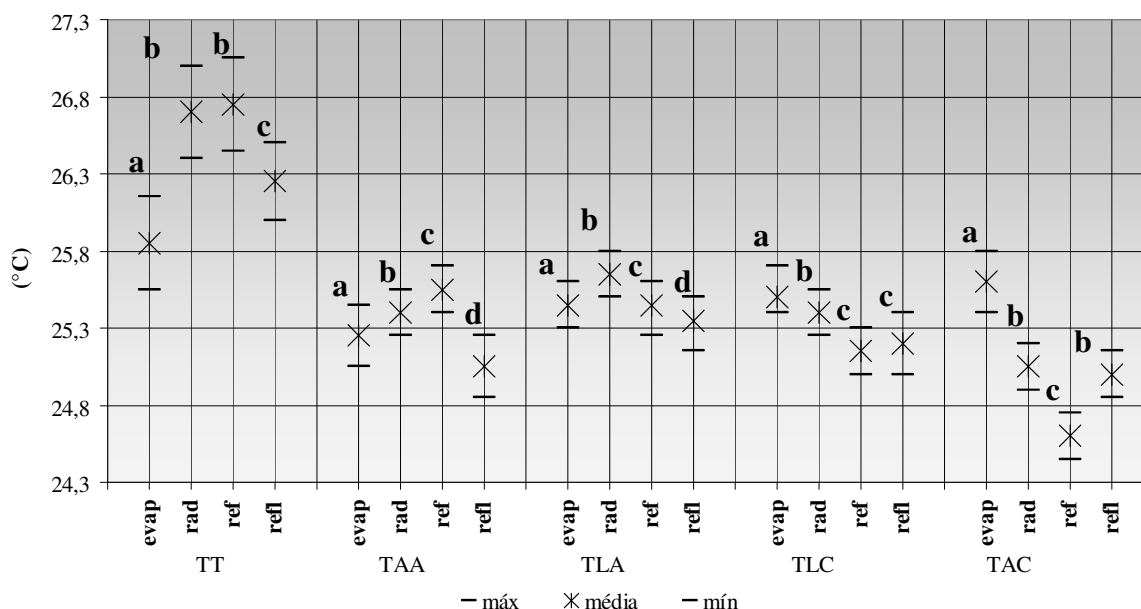
Figura 33: Teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para o 2º período monitorado, de 26 a 30 de jan/2006 (aspersão contínua).

Verifica-se a partir da Figura 33 que a temperatura de superfície interna da telha do sistema evaporativo (TTevap = 23,2 °C) difere significativamente das demais (TTrad = 24°C, TTref = 24,4°C e TTrefl = 23,9°C), mostrando-se a menor delas. O comportamento não se repete para a temperatura do ar do ático, que é menor para o sistema reflexivo neste período monitorado. Para as temperaturas de superfícies das lajes voltadas para os áticos (TLA's), os sistemas não diferem entre si (TLCevap = 23,7°C, TLCrad = 23,9°C e TLCrefl = 23,7°C) e entre a referência (TLCref = 24°C), comprovando o valor de $p > 0,05$ encontrado na ANOVA ($p = 0,06$).

Nas outras temperaturas monitoradas não há uma diferença altamente significativa entre elas, exceto na temperatura do ar da célula (TACevap = 24,8°C) em que o sistema evaporativo difere significativamente ($\alpha = 0,05$) das demais (TACrad = 23,8°C, TACref = 23,6°C e TACrefl = 23,9°C), apresentando-se com a temperatura mais elevada.

5.1.3 Terceiro período: Aspersão por 30min/intervalo 1h30min - de 31 de janeiro a 9 de fevereiro de 2006.

A variação da temperatura em função das variáveis manipuladas (temperaturas) é apresentada na Figura 34.



Letras diferentes para uma mesma variável monitorada (TT, TAA, TLA, TLC e TAC) diferem significativamente ($p < 0,05$) entre si (sistemas passivos aplicados) pelo Teste de Tukey.

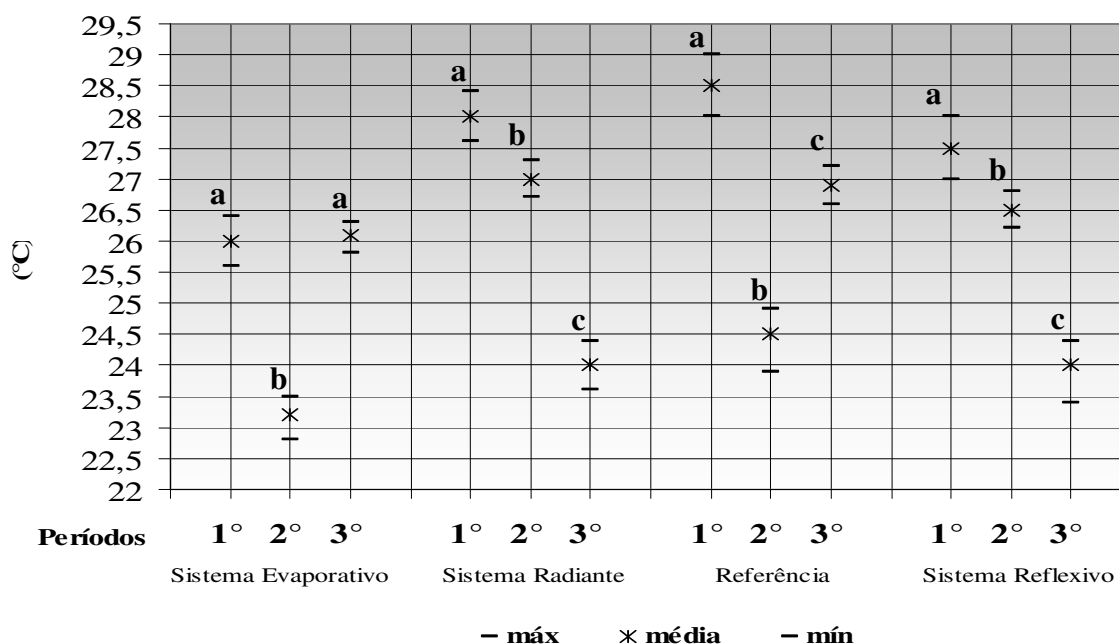
Figura 34: Teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para o 3º período monitorado de 31/jan a 9/fev/2006 (aspersão de 30min, intervalo de 1h30min).

Na Figura 34 tem-se as temperaturas de superfícies internas das telhas (TT's) e novamente, o sistema evaporativo (TTevap = 25,8°C) apresenta a menor média de temperatura. Há diferença significativa do sistema evaporativo para o radiante (TTtrad = 26,7°C) e de referencia (TTref = 26,75°C), e é atenuada para o sistema reflexivo (TTrefl = 26,2°C). Já nas temperaturas do ar dos áticos (TAA's), o sistema reflexivo (TAArefl = 25,0°C) apresenta a menor temperatura, diferindo do sistema evaporativo (TAAevap = 25,2°C).

5.2 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) E TESTE DE TUKEY DOS TRÊS PERÍODOS MONITORADOS

A partir dos resultados da análise anterior, verificou-se a necessidade de saber se os períodos monitorados diferiram entre si. Aplicou-se a ANOVA para cada variável monitorada comparando os períodos monitorados em cada sistema passivo. Para a ANOVA com significância de 95% ($p < 0,05$), todos os valores encontrados atenderam ao nível de confiabilidade. Uma vez determinada as diferenças, foi avaliado quais os períodos diferiram entre si pelo teste de comparação de médias de Tukey, conforme ilustram as Figuras 35 a 39.

5.2.1 Temperaturas das superfícies internas das Telhas – TT's



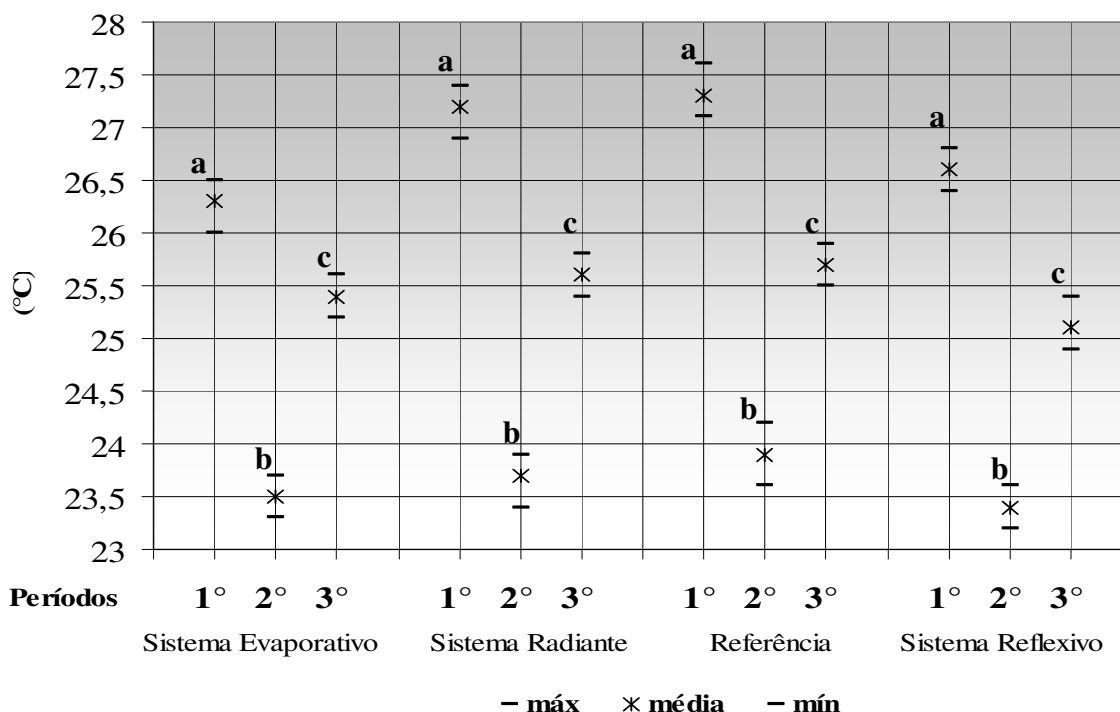
Onde: a, b e c diferem significativamente entre si com $p < 0,05$ em cada sistema passivo.

Figura 35: Teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para os três períodos monitorados: 1º período (21 a 25 de jan/2006, aspersão de 30min, intervalo de 30min), 2º período (26 a 30 de jan/2006, aspersão direta) e 3º período (31/jan a 9/fev/2006, aspersão de 30min, intervalo de 1h30min).

Verifica-se a partir da Figura 35 que as condições climáticas e a aspersão contínua do 2º período foram determinantes para a temperatura de superfície interna da telha do sistema

evaporativo ($TT_{\text{evap}} = 23,2^{\circ}\text{C}$), que diferiu significativamente do demais períodos, 1° e 3° (26°C e $26,1^{\circ}\text{C}$) respectivamente. Já para as condições climáticas monitoradas no 1° e 3° períodos, o tipo de ciclo de aspersão pouco interferiu no comportamento das médias, observando-se que estas diferiram estatisticamente. Os sistemas passivos que mais se aproximaram no comportamento das médias do evaporativo ($TT_{\text{evap}} = 23,2^{\circ}\text{C}$) são o sistema radiante ($TT_{\text{rad}} = 24^{\circ}\text{C}$) e reflexivo ($TT_{\text{refl}} = 24^{\circ}\text{C}$) para o terceiro período monitorado.

5.2.3 Temperaturas do Ar dos Áticos - TAA's



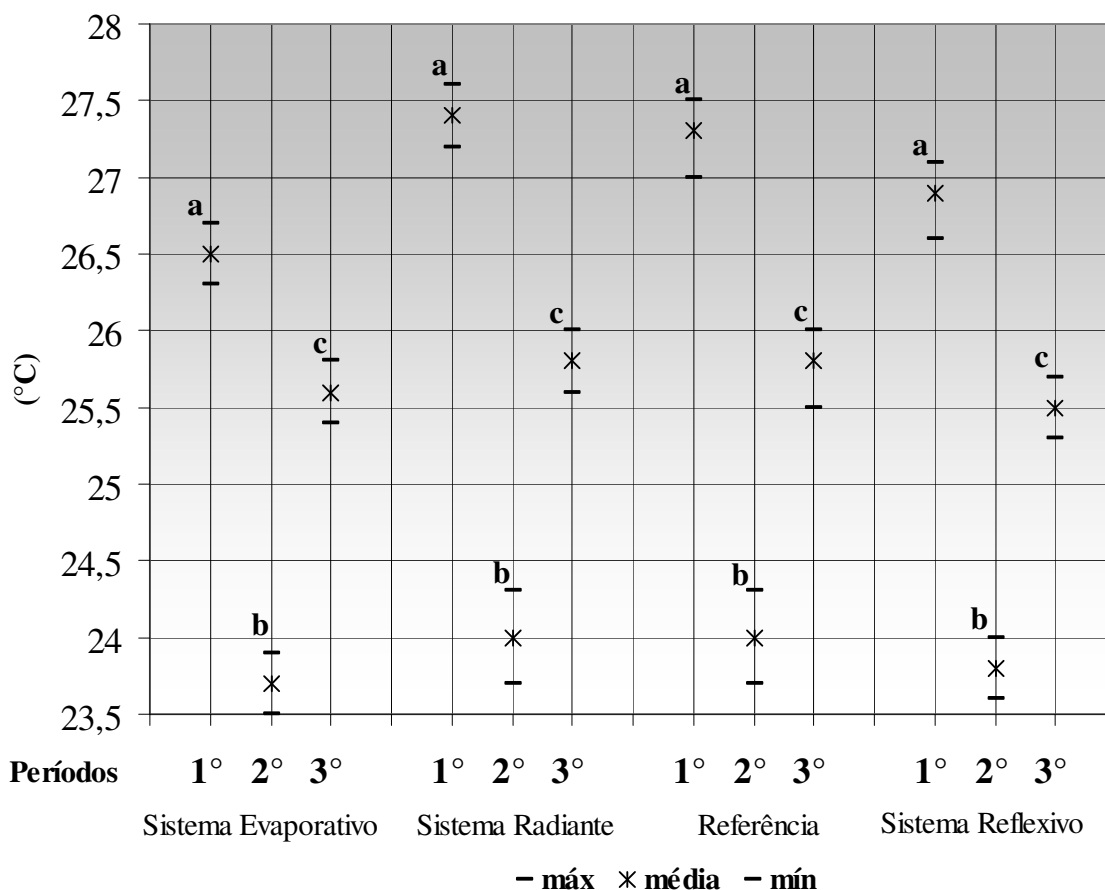
Onde: a, b e c diferem significativamente entre si com $p < 0,05$ em cada sistema passivo.

Figura 36: Teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para os três períodos monitorados: 1° período (21 a 25 de jan/2006, aspersão de 30min, intervalo de 30min), 2° período (26 a 30 de jan/2006, aspersão direta) e 3° período (31/jan a 9/fev/2006, aspersão de 30min, intervalo de 1h30min).

A Figura 36 apresenta as médias das temperaturas do ar dos áticos (TAA's) monitoradas nos três períodos. As menores médias dos sistemas passivos ($TAA_{\text{evap}} = 24^{\circ}\text{C}$, $TAA_{\text{rad}} = 24^{\circ}\text{C}$, $TAA_{\text{ref}} = 24^{\circ}\text{C}$ e $TAA_{\text{refl}} = 24^{\circ}\text{C}$), obtidas no 2° período não diferem

significativamente ($\alpha = 0,05$) entre si, no entanto, o sistema reflexivo ($TAA_{refl} = 24^{\circ}\text{C}$) difere da célula de referência ($TAA_{ref} = 24^{\circ}\text{C}$) ao nível de 95% de confiabilidade ($p < 0,05$).

5.2.3 Temperaturas de superfície das Lajes voltadas para os Áticos - TLA's

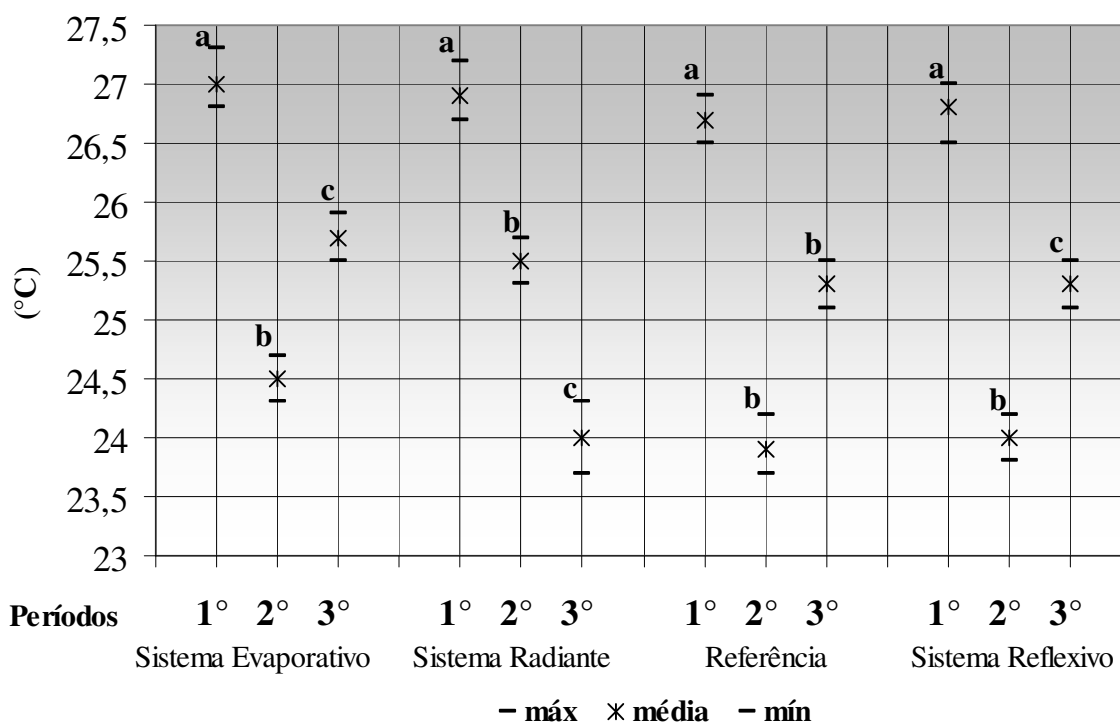


Onde: a, b e c diferem significativamente entre si com $p < 0,05$ em cada sistema passivo.

Figura 37: Teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para os três períodos monitorados: 1º período (21 a 25 de jan/2006, aspersão de 30min, intervalo de 30min), 2º período (26 a 30 de jan/2006, aspersão direta) e 3º período (31/jan a 9/fev/2006, aspersão de 30min, intervalo de 1h30min).

Observa-se na Figura 37 que as menores médias apresentam-se no 2º período monitorado de cada sistema passivo ($T_{LA_{evap}} = 23,7^{\circ}\text{C}$, $T_{LA_{rad}} = 24^{\circ}\text{C}$, $T_{LA_{ref}} = 24^{\circ}\text{C}$, $T_{LA_{refl}} = 23,8^{\circ}\text{C}$) e não diferem entre si ($\alpha = 0,05$) para as temperaturas de superfícies de lajes voltadas para os áticos (TLA's).

5.2.4 Temperaturas de superfícies de Lajes voltadas para as Células – TLC's

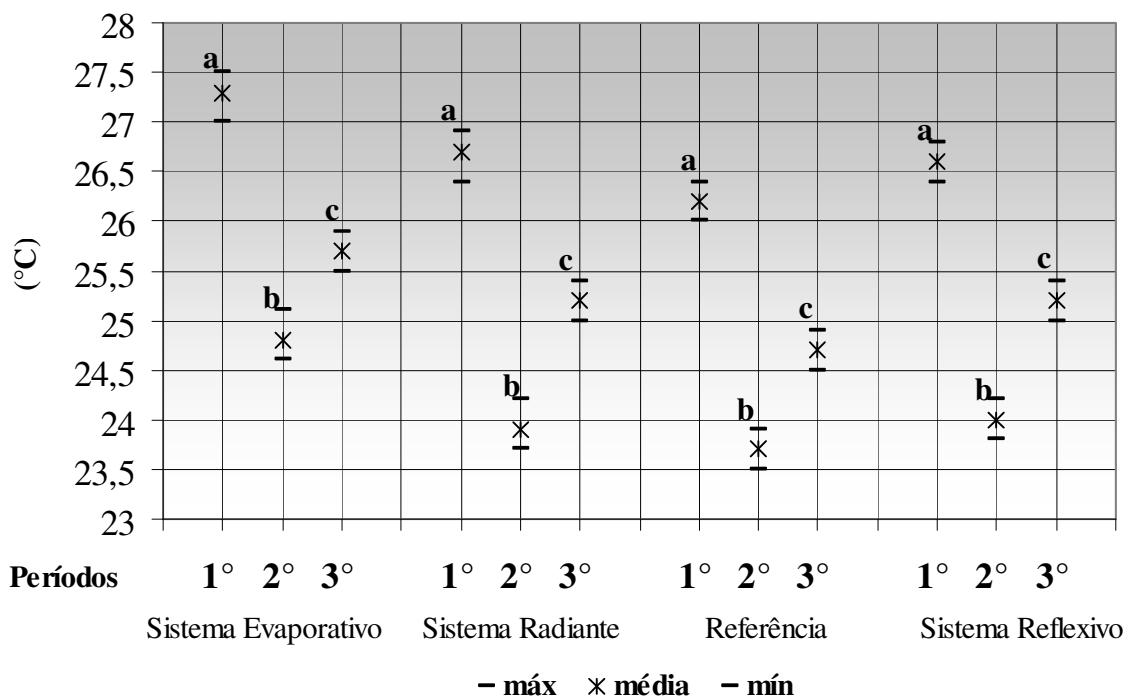


Onde: a, b e c diferem significativamente entre si com $p < 0,05$ em cada sistema passivo.

Figura 38: Teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para os três períodos monitorados: 1° período (21 a 25 de jan/2006, aspersão de 30min, intervalo de 30min), 2° período (26 a 30 de jan/2006, aspersão direta) e 3° período (31/jan a 9/fev/2006, aspersão de 30min, intervalo de 1h30min).

Observa-se a partir da Figura 38 o comportamento das médias para as temperaturas de superfície das lajes voltadas para as células (TLC's). Não há diferença estatística ao nível de 95% de confiança ($p < 0,05$) para o 3° período do sistema radiante ($TLC_{rad} = 24^{\circ}C$) e 2° período do sistema reflexivo ($TLC = 23,9^{\circ}C$) e referência $TLC_{ref} = 24^{\circ}C$.

5.2.5 Temperaturas do Ar das Células-Teste – TAC's



Onde: a, b e c diferem significativamente entre si com $p < 0,05$ em cada sistema passivo.

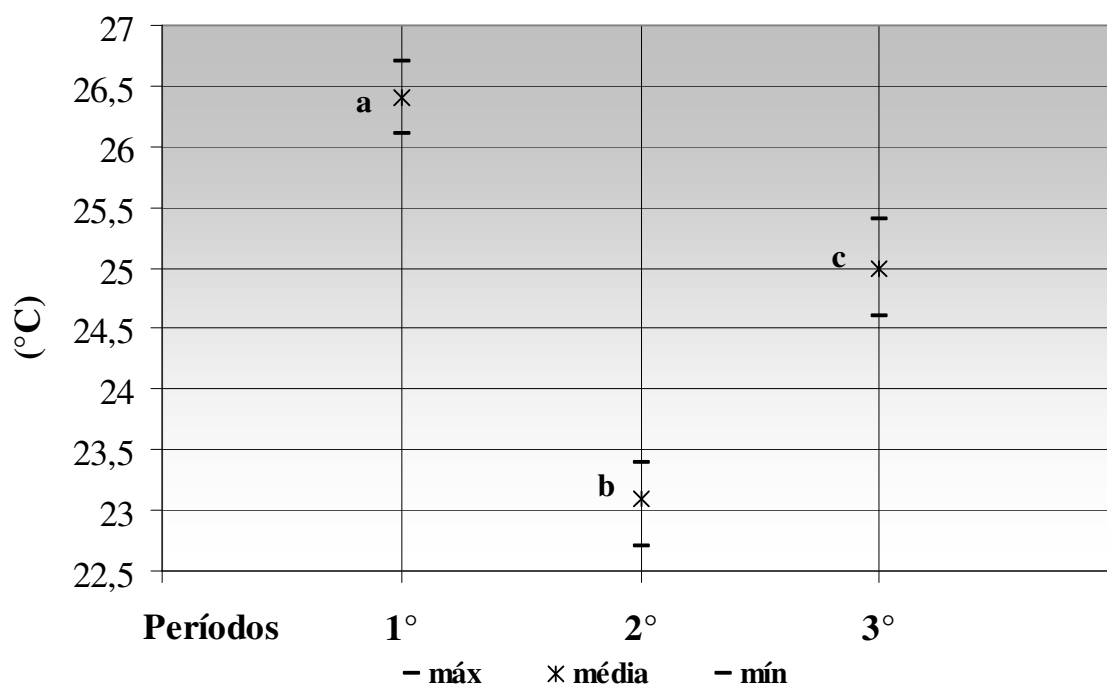
Figura 39: Teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para os três períodos monitorados: 1° período (21 a 25 de jan/2006, aspersão de 30min, intervalo de 30min), 2° período (26 a 30 de jan/2006, aspersão direta) e 3° período (31/jan a 9/fev/2006, aspersão de 30min, intervalo de 1h30min).

Na Figura 39 observa-se que as menores médias das temperaturas do ar das células-teste (TAC's) foram encontradas no 2° período dos sistemas radiante ($TAC_{rad} = 23,9^{\circ}C$), reflexivo ($TAC_{refl} = 24^{\circ}C$) e na referência ($TAC_{ref} = 23,7^{\circ}C$). Já as temperaturas do ar nas células-teste (TAC's) não diferiram significativamente entre si ($\alpha = 0,05$). O sistema evaporativo ($TAC_{evap} = 24,8^{\circ}C$) no 2° período apresentou-se diferindo das demais estatisticamente, porém com valores das médias mais altos do conjunto.

5.3 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) E TESTE DE TUKEY DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS MONITORADAS NOS TRÊS PERÍODOS

Na ANOVA aplicada para as variáveis meteorológicas monitoradas pela estação do campus para o nível de significância de 5%, todas as variáveis obtiveram $p < 0,05$. A seguir será ilustrado o Teste das médias de Tukey para cada variável meteorológica nos três períodos monitorados.

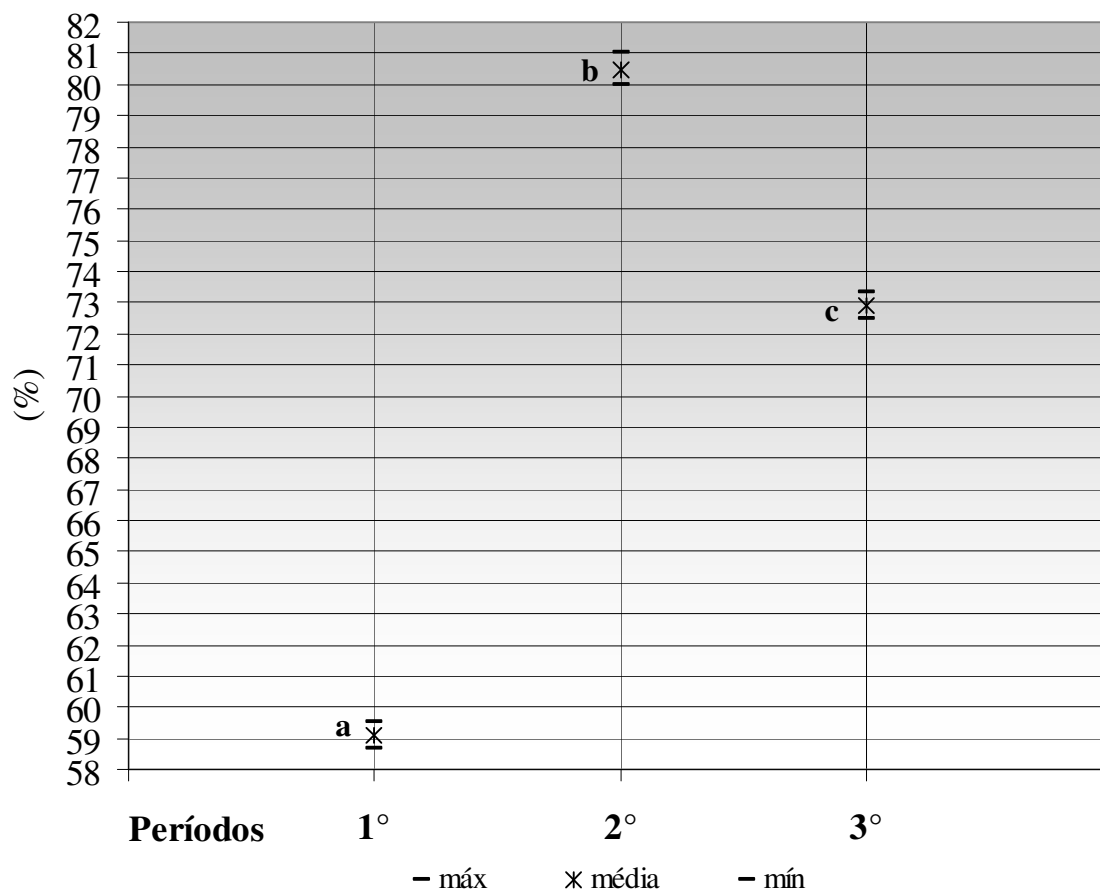
5.3.1 Temperatura do Ar Externo (Ta)



Onde: a, b e c diferem significativamente entre si com $p < 0,05$.

Figura 40: Teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para a temperatura do ar externo (°C) nos três períodos monitorados.

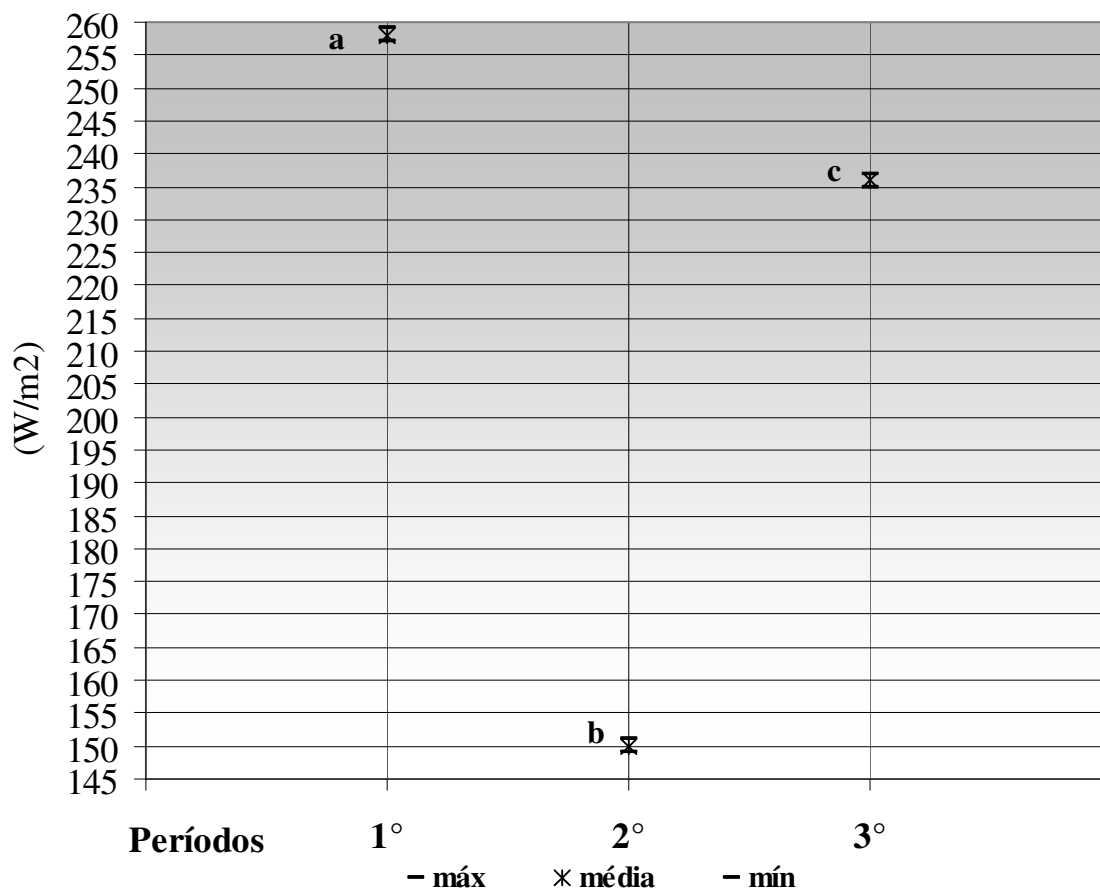
5.3.2 Umidade Relativa do Ar Externo (U)



Onde: a, b e c diferem significativamente entre si com $p < 0,05$.

Figura 41: Teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para a umidade relativa do ar externo (%) nos três períodos monitorados.

5.3.4 Radiação Solar (R)

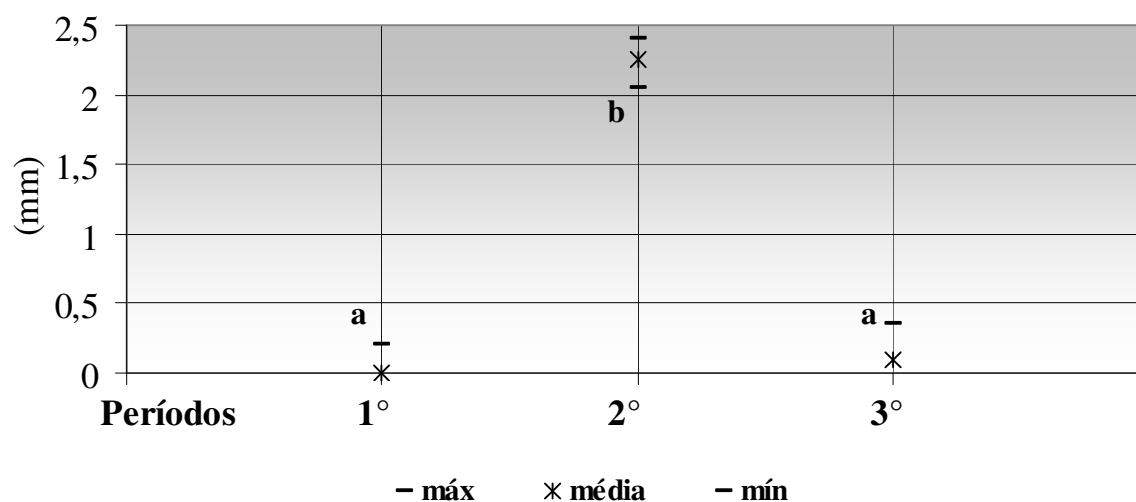


Onde: a, b e c diferem significativamente entre si com $p < 0,05$.

Figura 42: Teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para a radiação solar (W/m^2) nos três períodos monitorados.

Nas Figuras 40 a 44 pode ser observado o Teste de comparação das médias de Tukey para as variáveis meteorológicas: temperatura do ar (T_a), radiação solar (R), umidade relativa do ar (U), índice pluviométrico (C) e velocidade do vento (V). Como ilustram as Figuras 40, 41 e 42, verifica-se que as médias destas variáveis diferem significativamente entre si ($\alpha = 0,05$) nos três períodos monitorados.

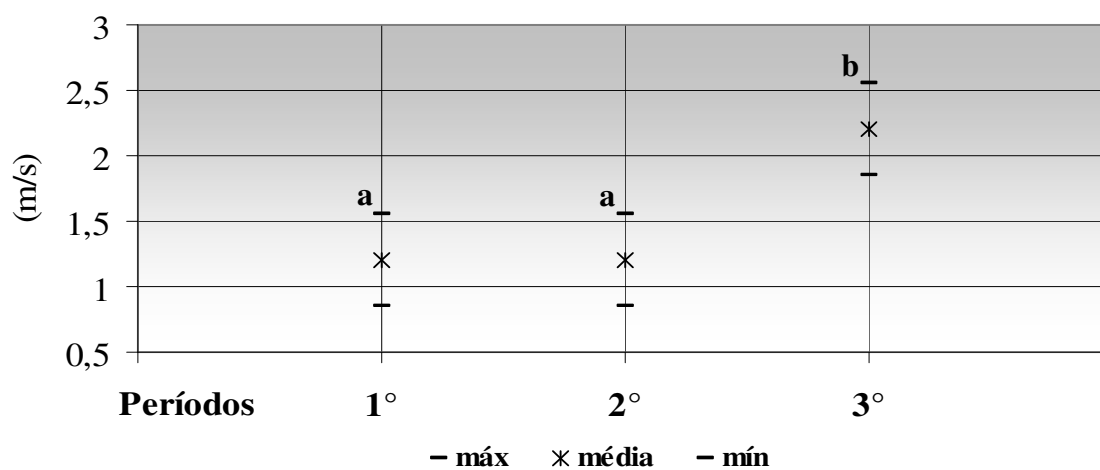
5.3.5 Índice Pluviométrico (C)



Onde: a e b diferem significativamente entre si com $p < 0,05$.

Figura 43: Teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para o índice pluviométrico (mm) nos três períodos monitorados.

5.3.6 Vento (V)



Onde: a e b diferem significativamente entre si com $p < 0,05$.

Figura 44: Teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para vento (m/s) nos três períodos monitorados.

As Figuras 43 e 44 trazem as variáveis: índice pluviométrico (C) e vento (V) respectivamente. No teste das médias de Tukey, afere-se que o índice pluviométrico (C) não difere significativamente para os períodos de 21 a 25/jan (1º período) e 31/jan a 09/fev de 2006 (2º período) com 0 e 0,1mm respectivamente em comparação com 2,2mm entre 26 a 30/jan (2º período).

A variável velocidade do vento, para os períodos de 21 a 30/jan de 2006 (1º e 2º períodos), apresentou 1,2 m/s diferindo significativamente do 3º período, 2,2 m/s.

5.4 ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA (RLM)

O modelo de Regressão Linear Múltipla (RLM), segundo Fonseca (1982), auxiliou a interpretação da relação funcional entre as variáveis de cada sistema de resfriamento passivo para o estabelecimento de uma fórmula empírica para a probabilidade de erro menor que 5% ($p < 0,05$).

Visando avaliar as influências das variáveis meteorológicas nos perfis de temperaturas aplicou-se a análise de regressão linear múltipla. O coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado como indicador de validação do modelo estatístico. De acordo com Charnet (1999) o coeficiente de determinação pode variar de -1 a 1, sendo que quanto mais próximo dos valores limites, maior a relação entre as variáveis. Os dados da regressão estão indicados nas Tabelas 6, 7 e 8, para os três períodos, respectivamente.

TABELA 6: Análise de Regressão: Aspersão 30 min/intervalo 30 min (21-25/01/06).

Modelo Estatístico		R ²	P
Referência	Temperatura superfície interna da Telha TT = -19,9396 + 1,6582Ta + 0,0719U + 0,0010R + 0,0004C	0,94	0,0000
	Temperatura do Ar do Ático TAA = 10,41628 + 0,70525Ta - 0,02630U - 0,00046R + 0,00121C	0,80	0,0000
	Temperatura de superfície interna da Laje para o Ático TLA = 19,65171 + 0,42306Ta - 0,05373U - 0,00084R + 0,00178C	0,56	0,0000
	Temperatura de superfície da Laje para a Célula TLC = 23,98322 + 0,25271Ta - 0,05954U - 0,00098R + 0,00203C	0,38	0,0000
	Temperatura do Ar da Célula TAC = 23,43540 + 0,23264Ta - 0,05176U - 0,00078R + 0,00153C	0,44	0,0000
Sistema Evaporativo	Temperatura superfície interna da Telha TT = -10,1689 + 1,2064Ta + 0,0731U - 0,0005R + 0,0005C	0,90	0,0000
	Temperatura do Ar do Ático TAA = 11,21649 + 0,60569Ta - 0,00046R + 0,00091C	0,78	0,0000
	Temperatura de superfície interna da Laje para o Ático TLA = 16,19125 + 0,46015Ta - 0,02593U - 0,00060R + 0,00124C	0,63	0,0000
	Temperatura de superfície da Laje para a Célula TLC = 26,60902 + 0,16674Ta - 0,06086U - 0,00096R + 0,00166C	0,32	0,0000
	Temperatura do Ar da Célula TAC = 23,37948 + 0,29512Ta - 0,06128U - 0,00077R + 0,00128C	0,50	0,0000
Sistema Radiante	Temperatura superfície interna da Telha TT = 3,587170 + 0,960037Ta - 0,0177521U + 0,000298R	0,96	0,000
	Temperatura do Ar do Ático TAA = 15,51095 + 0,54954Ta - 0,04556U - 0,00045R + 0,00081C	0,82	0,0000
	Temperatura de superfície interna da Laje para o Ático TLA = 25,86211 + 0,23073Ta - 0,07247U - 0,00080R + 0,00160C	0,50	0,0000
	Temperatura de superfície da Laje para a Célula TLC = 28,80915 - 0,07491U - 0,00095R + 0,00185C	0,33	0,0000
	Temperatura do Ar da Célula TAC = 25,08592 + 0,20728Ta - 0,05976R - 0,00086R + 0,00178C	0,40	0,0000
Sistema Reflexivo	Temperatura superfície interna da Telha TT = -20,9345 + 1,6492Ta + 0,0764U + 0,0010 R	0,94	0,0000
	Temperatura do Ar do Ático TAA = 9,780694 + 0,709445Ta - 0,030937U - 0,000351R + 0,000646C	0,89	0,0000
	Temperatura de superfície interna da Laje para o Ático TLA = 20,66788 + 0,37728Ta - 0,05833U - 0,00075R + 0,00155C	0,60	0,0000
	Temperatura de superfície da Laje para a Célula TLC = 26,55179 + 0,16776Ta - 0,06391U - 0,00098R + 0,00185C	0,34	0,0000
	Temperatura do Ar da Célula TAC = 24,46412 + 0,22100Ta - 0,05634U - 0,00084R + 0,00165C	0,42	0,0000

* Foram considerados no modelo apenas os fatores significativos para $\alpha=0,05$.

**Ta – temperatura do ar externo; U – umidade do ar; R – radiação; C – índice pluviométrico.

TABELA 7: Análise de Regressão: Aspersão contínua (26-30/01/06).

Modelo Estatístico		R ²	P
Referência	Temperatura superfície interna da Telha TT = -13,7194 + 1,5235Ta + 0,0352U + 0,0002R + 0,0003C	0,94	0,0000
	Temperatura do Ar do Ático TAA = 20,45692 + 0,42919Ta - 0,08065U + 0,00032C	0,81	0,0000
	Temperatura de superfície interna da Laje para o Ático TLA = 40,20097 - 0,17158U + 0,00036C	0,57	0,0000
	Temperatura de superfície da Laje para a Célula TLC = 45,07049 - 0,27828Ta - 0,18323U + 0,00041C	0,42	0,0000
	Temperatura do Ar da Célula TAC = 38,90852 - 0,14674U + 0,00034C	0,49	0,0000
Sistema Evaporativo	Temperatura superfície interna da Telha TT = -15,7467 + 1,3003Ta + 0,1096U + 0,0001R	0,91	0,0000
	Temperatura do Ar do Ático TAA = 19,20723 + 0,37708Ta - 0,05464U	0,78	0,0000
	Temperatura de superfície interna da Laje para o Ático TLA = 27,73711 - 0,09100U	0,63	0,0000
	Temperatura de superfície da Laje para a Célula TLC = 39,59556 - 0,14161U	0,37	0,0000
	Temperatura do Ar da Célula TAC = 36,36190 - 0,14292U + 0,00047C	0,52	0,0000
Sistema Radiante	Temperatura superfície interna da Telha TT = 5,155926 + 0,966559Ta - 0,044194U + 0,000063R + 0,000204C	0,97	0,0000
	Temperatura do Ar do Ático TAA = 21,20035 + 0,39090Ta - 0,08140U + 0,00023C	0,85	0,0000
	Temperatura de superfície interna da Laje para o Ático TLA = 40,37000 - 0,16211U	0,53	0,0000
	Temperatura de superfície da Laje para a Célula TLC = 45,57453 - 0,30914Ta - 0,17874U + 0,00035C	0,39	0,0000
	Temperatura do Ar da Célula TAC = 43,22506 - 0,24338Ta - 0,16980U + 0,00040C	0,44	0,0000
Sistema Reflexivo	Temperatura superfície interna da Telha TT = -23,4614 + 1,7464Ta + 0,0856U + 0,0003R	0,93	0,0000
	Temperatura do Ar do Ático TAA = 14,45808 + 0,57115Ta - 0,05345U	0,90	0,0000
	Temperatura de superfície interna da Laje para o Ático TLA = 35,77373 - 0,14553U	0,61	0,0000
	Temperatura de superfície da Laje para a Célula TLC = 45,32639 - 0,30484Ta - 0,17761U	0,38	0,0000
	Temperatura do Ar da Célula TAC = 40,10945 - 0,15171U + 0,00034C + 0,00034C	0,46	0,0000

* Foram considerados no modelo apenas os fatores significativos para $\alpha=0,05$.

**Ta – temperatura do ar externo; U – umidade do ar; R – radiação; C – índice pluviométrico.

TABELA 8: Análise de Regressão: Aspersão 30min/intervalo 1h30min (31/1-09/2/06).

Modelo Estatístico		R ²	P
Referência	Temperatura superfície interna da Telha $TT = 1,236654Ta - 0,048132U + 0,000735R + 0,000934C$	0,92	0,0000
	Temperatura do Ar do Ático $TAA = 8,765854 + 0,735333Ta - 0,018050U - 0,000428R + 0,001165C$	0,80	0,0000
	Temperatura de superfície interna da Laje para o Ático $TLA = 16,12928 + 0,49775Ta - 0,03624U - 0,00078R + 0,00159C$	0,56	0,0000
	Temperatura de superfície da Laje para a Célula $TLC = 15,82430 - 0,43781Ta - 0,00090R + 0,00183C$	0,41	0,0000
	Temperatura do Ar da Célula $TAC = 12,55670 + 0,47921Ta - 0,00075R + 0,00130C$	0,48	0,0000
Sistema Evaporativo	Temperatura superfície interna da Telha $TT = 1,12766Ta + 0,00059R + 0,00089C$	0,87	0,0000
	Temperatura do Ar do Ático $TAA = 5,480075 + 0,760620Ta - 0,000449R + 0,001155C$	0,78	0,0000
	Temperatura de superfície interna da Laje para o Ático $TLA = 9,997631 + 0,633567Ta - 0,000592R + 0,001337C$	0,67	0,0000
	Temperatura de superfície da Laje para a Célula $TLC = 11,96069 + 0,50148Ta - 0,00096R + 0,00152C$	0,34	0,0000
	Temperatura do Ar da Célula $TAC = 9,125460 + 0,616355Ta - 0,000852R + 0,001491C$	0,50	0,0000
Sistema Radiante	Temperatura superfície interna da Telha $TT = 5,665927 + 1,024098Ta - 0,060531U + 0,000528R + 0,000378C$	0,94	0,0000
	Temperatura do Ar do Ático $TAA = 8,786217 + 0,712892Ta - 0,000374R + 0,000865C$	0,83	0,0000
	Temperatura de superfície interna da Laje para o Ático $TLA = 15,86465 + 0,48003Ta - 0,02589U - 0,00076R + 0,00140C$	0,54	0,0000
	Temperatura de superfície da Laje para a Célula $TLC = 15,74104 - 0,42399Ta - 0,00089R + 0,00172C$	0,37	0,0000
	Temperatura do Ar da Célula $TAC = 14,21743 + 0,46031Ta - 0,00082R + 0,00159C$	0,43	0,0000
Sistema Reflexivo	Temperatura superfície interna da Telha $TT = -9,30311 + 1,42448Ta + 0,00089R + 0,00086C$	0,91	0,0000
	Temperatura do Ar do Ático $TAA = 0,887941Ta + 0,020173U - 0,000285R + 0,000887C$	0,86	0,0000
	Temperatura de superfície interna da Laje para o Ático $TLA = 10,68485 + 0,60173Ta - 0,00072R + 0,00140C$	0,58	0,0000
	Temperatura de superfície da Laje para a Célula $TLC = 14,68727 + 0,43566Ta - 0,00091R + 0,00162C$	0,35	0,0000
	Temperatura do Ar da Célula $TAC = 12,86085 + 0,48100Ta - 0,00081R + 0,00149C$	0,43	0,0000

*Foram considerados no modelo apenas os fatores significativos para $\alpha=0,05$.

**Ta – temperatura do ar externo; U – umidade do ar; R – radiação; C – índice pluviométrico.

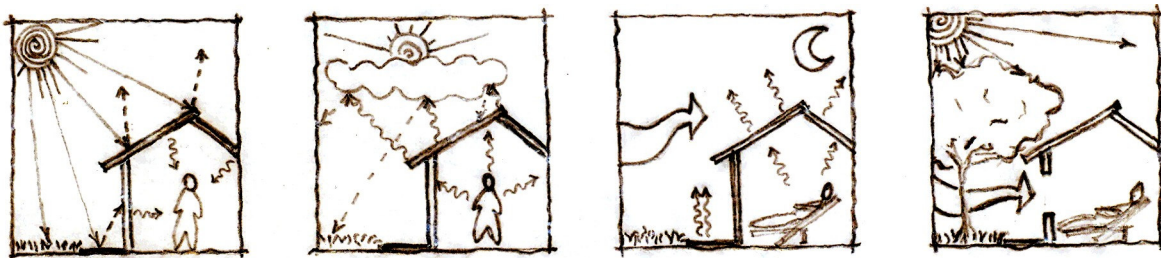
Observando-se os dados das Tabelas 6, 7 e 8, verifica-se que a temperatura do ar influencia significativamente os perfis das temperaturas manipuladas. As variáveis: umidade (U), radiação (R) e o índice pluviométrico (C) interferem pouco na composição das temperaturas, monitoradas nos três períodos.

A partir dos modelos estatisticamente obtidos é possível prever o valor da temperatura nos sistemas em função dos fatores: temperatura do ar (T_a), umidade (U), radiação (R) e índice pluviométrico (C). A variável velocidade do vento (V) foi excluída na Análise de Regressão Linear Múltipla (RLM), pois seus valores não satisfizeram o nível de confiabilidade de 95%, ou seja, nos três períodos monitorados e para todas as equações de regressão das variáveis, a variável velocidade do vento (V) apresentou valores de p maiores que 0,05 ($p > 0,05$).

As validades destes modelos podem ser avaliadas em função dos coeficientes de determinação e dos níveis de probabilidade, que sugerem a linearidade da relação das variáveis meteorológicas.

É observado, ainda, que as variáveis manipuladas TT's (temperaturas das superfícies internas das telhas) e TAA's (temperaturas do ar dos áticos), para todos os sistemas, são explicadas em grande parte pelas variáveis meteorológicas: temperatura do ar (T_a) e umidade (U). O mesmo já não ocorre para as demais variáveis manipuladas TLA's (temperaturas de superfície das lajes para os áticos), TLC's (temperaturas de superfície das lajes para as células), TAC's (temperaturas do ar das células), uma vez que suas variações não dependem exclusivamente das variáveis climáticas monitoradas, conforme sugerido pelos coeficientes de determinação (R^2).

6. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO



São conhecidos os processos físicos de transferência de calor que ocorrem nos elementos construtivos de edificações expostos aos rigores climáticos. Em clima de características tropicais é acentuada a sensação de desconforto térmico provocada por construções de baixa massa térmica.

Na periferia de Campinas é uma realidade a proliferação de residências com cobertura de telha de fibrocimento sem laje de forro (figura 45), devido ao seu baixo custo e simplificação da estrutura portante.



Figura 45 – Periferia de Campinas: homogeneidade das construções, sem laje de forro, telha de fibrocimento e alvenaria sem reboco externo. Foto da autora.

Os resultados apresentados no capítulo anterior possibilitam levantar algumas observações relacionadas à metodologia adotada. Observou-se que as estruturas físicas das células-teste interferiram nos resultados das variáveis: temperaturas das superfícies de lajes voltadas para os áticos (TLA's), temperaturas de superfícies de lajes voltadas para as células (TLC's) e temperaturas do ar das células-teste (TAC). A presença da laje de cobertura separando o ático da célula, além da configuração da cobertura em relação à orientação (inclinação para Leste) e proporção (área de cobertura = $5,94 \text{ m}^2 < \text{qualquer uma das duas fachadas que mais recebem radiação solar à tarde, Norte} = 7,2 \text{ m}^2 \text{ e Oeste} = 6,6 \text{ m}^2$) foram

desfavoráveis para se elaborar uma conclusão da interferência das técnicas passivas nestas variáveis manipuladas.

Outra observação relevante foi a falta de dados monitorados a respeito da umidade no interior da célula e monitoramento simultâneo de ciclos de aspersão diferentes, além da necessidade de monitorar todos os sistemas no início da primavera (calor elevado e baixa umidade relativa do ar).

No entanto, por se tratar de uma pesquisa experimental e do envolvimento de muitos fatores alheios à vontade do pesquisador (disponibilidade de tempo, número suficiente de células-teste, condições meteorológicas apropriadas, equipamentos) destaca-se sua importância como instrumento para elucidar a etapa mais importante de uma pesquisa, o planejamento metodológico.

Conclui-se que as menores temperaturas nas superfícies internas das telhas (TT's) com o uso das técnicas de resfriamento foram apresentadas no sistema evaporativo (TTevap = 26,3°C) no 2º período (26 a 30/jan). Este período se destacou dos demais por apresentar a menor temperatura do ar externo do período ($T = 23,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) associada à baixa radiação solar ($R = 150\text{W/m}^2$) e ao alto índice pluviométrico do período ($C = 2,2\text{mm}$). Este período apresentou média de umidade relativa do ar alta ($U > 80\%$) em relação aos demais.

No entanto, o 1º período (25 a 26/jan) que apresentou a mais baixa média de umidade relativa do ar ($U = 59,1\%$), associada a médias elevadas de temperatura do ar ($T = 26,4^{\circ}$) e radiação solar ($R = 258\text{W/m}^2$) não constituiu um conjunto favorável para a aplicação de nenhum dos sistemas monitorados, desmistificando assim, a viabilidade do emprego do sistema evaporativo somente em localidades de muito calor e de baixa umidade relativa do ar.

Aferiu-se que para as temperaturas do ar dos áticos (TAC's) somente o 2º período, novamente, apresentou condições que possibilitassem obter as mais baixas temperaturas; assim, o sistema reflexivo apresentou (TAArefl = 23,4°C) e o sistema evaporativo (TAAevap = 23,5°C).

Já para implantação e viabilidade de quaisquer sistemas passivos monitorados recomenda-se um estudo mais aprofundado em relação ao monitoramento em outras épocas do ano. Para viabilizar a aplicabilidade do sistema evaporativo recomenda-se a instalação de um sistema de captação de águas pluviais, visto que muitas áreas brasileiras sofrem com a falta de abastecimento regular de água em seus domicílios, além de ser uma atitude mais coerente com o panorama de utilização sustentável dos recursos naturais. Para residências brasileiras não há uma legislação vigente que exija, além do reservatório de água potável, um outro, para armazenar águas pluviais para usos menos nobres. Mas, já é possível encontrar algumas construtoras preocupadas com o reuso da água para lavagens de piso, regas de jardim, etc, além de prever, em seus projetos de edifícios residenciais, este sistema de captação. No entanto, o custo de aplicação de quaisquer sistemas passivos poderia ser menor e brevemente capitalizado, se os mesmos fossem incorporados na fase de projetos, antecedendo o planejamento e a execução da obra.

Considerando uma residência que já possui reservatório e captação de águas pluviais, ou seja, dispõe de bomba e caixa d'água previamente instalados, para instalar o sistema evaporativo na cobertura seria necessário aplicar tubulação de PVC (ao custo de R\$ 10,00 a barra de 3/4") atendendo a área de atuação do micro aspersor (raio de 1m²) com custo aproximado de R\$1,00 a peça (figura 46). O timer para o acionamento do sistema sairia por aproximadamente R\$ 35,00 (todos os valores de agosto de 2005).

A precisão sobre o volume de água utilizado, no resfriamento evaporativo, não pode ser aferida integralmente, pois o hidrômetro instalado não considerou a perda que ocorria pela não captação da água excedente (não utilizada no processo de evaporação) que por ventura escorresse pela telha. Foi um parâmetro utilizado para se obter uma noção do consumo médio. Para obter resultados mais precisos seria conveniente caracterizar o experimento para captar quaisquer perdas d'águas, devido não só ao excedente (o que escorre pela cobertura dependendo do ciclo de aspersão), mas também o que evapora e, devido à ação do movimento do ar, segue outra direção que não a da cobertura.



Figura 46 – Vista da aspersão d'água em um dos aspersores na cobertura.



Figura 47 – Vista da bobina de filme adesivo de alumínio, com 1m de largura.

Já para o sistema radiante, o custo de aquisição do filme adesivo (figura 47) seria de R\$ 8,00/m² (valor em maio de 2006), segundo a Vacuoflex (empresa que gentilmente cedeu o filme de alumínio para a pesquisa). Para o funcionamento do sistema, a princípio, qualquer filme de alumínio disponível no mercado seria eficiente, desde que preservadas as características de baixa emissividade. Porém a característica de ser auto-adesivo facilita sua aplicação e fixação na cobertura.

Certamente, manutenções serão necessárias nos três sistemas. A substituição dos aspersores será necessária, quando entupidos, devido à composição da água local propiciar o acúmulo de impurezas, ou caso não haja um sistema de filtragem da água no sistema. Já a película de alumínio necessitará de um reforço de fixação das bordas no telhado, devido à ação dos ventos e também, não dispensará uma limpeza periódica da superfície exposta, como também a pintura branca necessita estar sempre livre de poeira, fuligem e poluição para conservar sua característica de alta refletância.

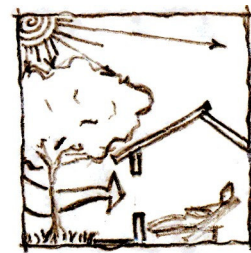
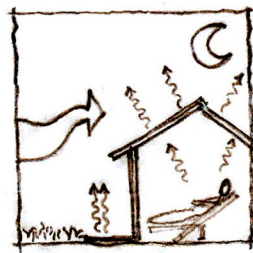
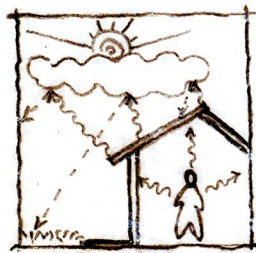
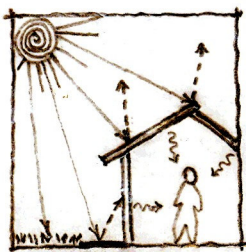
É fato, que além da necessidade de equipamentos técnicos e definição do tema da pesquisa, um futuro pesquisador precisa estar munido de muita paciência e persistência, principalmente em se tratando de uma pesquisa experimental desenvolvida num ambiente com trâmites burocráticos. Imprevistos e dificuldades certamente existirão e não foram poucos nessa pesquisa: a falta de disponibilidade de um maior número de células-teste, entupimento dos aspersores, necessidades de limpeza da caixa d'água, acidentes com equipe de limpeza, terceirizada do Campus, resultando na danificação do sistema de alimentação da bomba d'água, entre outros. Uma pesquisa que estuda comportamento térmico de quaisquer elementos construtivos também depende fortemente, das alterações do clima local ao longo dos prazos estipulados.

Apesar dos imprevistos a que uma pesquisa experimental está sujeita, espera-se que os resultados aqui apresentados possam incentivar mais pesquisadores a desenvolverem e testarem novos sistemas passivos, enriquecendo a nossa literatura em arquitetura bioclimática e propiciando aos projetistas ferramentas que possibilitem a atenuação das hostilidades climáticas nas edificações brasileiras, sem apelos constantes aos sistemas mecânicos e dispendiosos de energia.

Assim, sugerem-se temas a serem abordados em trabalhos futuros que complementem e proporcionem melhor entendimento do comportamento térmico das técnicas passivas:

- Monitorar simultaneamente os diferentes ciclos de aspersões do sistema evaporativo: para aferição com maior exatidão da eficiência da relação água - tempo de aspersão;
- Monitorar simultaneamente coberturas com sistema reflexivo de idades diferentes: aferindo a relação albedo - envelhecimento;
- Monitorar simultaneamente coberturas com sistema radiante: aplicação do filme de alumínio sob e sobre a telha (se possível protegida da radiação solar);
- Monitorar as temperaturas internas de células-teste, bem como umidade e velocidade do ar interno (se for o caso);
- Avaliar a aplicação dos sistemas passivos de resfriamento em outros tipos de cobertura e em outras épocas do ano.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS



AKBARI, H.; BRETZ, S.; KURN, D. M.; HANFORD, J. Peak power and cooling energy saving of high-albedo roofs. *Energy and Buildings*, n25, p.117-126, 1997.

AL-SANEA, S. A. Thermal performance of building roof elements. *Building and Environment*, n. 37, p. 665-675, 2002.

ALLUCI, M. P.; CARNEIRO, C.M.; BARING, J. G. DE A. *Implantação de conjuntos habitacionais. Recomendações para adequação climática e acústica*. São Paulo: IPT, 1986

AROTEGUI, J. M. El Proyecto para la eficiencia térmica de los edificios. *III Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído* – ENCAC. Gramado/RS: 1995. (apostila de curso).

ANDREASI, W. A. *Avaliação do impacto de estratégias bioclimáticas na temperatura de edificações no Passo do Lontra do Estado do Mato Grosso do Sul*. 2001. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, CTC, ECV. Florianópolis, 2001.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. Fundamentals Handbook, 1981.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. Physiological principles and thermal comfort. Fundamentals Handbook, Atlanta, USA, 2004.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. *Thermal environment conditions for human occupancy*. Standard 55-1992, Atlanta, USA, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 15220: Desempenho Térmico de Edificações*. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e

diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

BADRAN, A. A. Performance of cool towers under various climates in Jordan. *Energy and Building*, n.35, p.1031-1035, 2003.

BARRIO, E. P. D. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*, n.27, p.179-193, 1998.

BERDAHL, P.; BRETZ, S. E. Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. *Energy and Buildings*, n. 25, p. 149-158, 1997.

BOGO, A.; PIETROBON, C. E.; BARBOSA, M. J.; GOULART, S.; PITTA, T.; LAMBERTS, R. *Bioclimatologia aplicada ao projeto de edificações visando o conforto térmico*. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Relatório Interno nº 02, 1994.

BRETZ, S. E.; AKBARI, H. Long-term performance of high-albedo roof coatings. *Energy and Buildings*, n. 25, p. 159-167, 1997.

BRETZ, S.; AKBARI, H.; ROSENFELD, A. H. Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat island. *Atmospheric Environment*, vol. 32, n. 1, p.95-101, 1998.

CAVALCANTI, J. R. de S. *Estudo experimental comparativo entre resfriamento evaporativo e radiativo em ambientes cobertos com telhas de fibrocimento em região de clima quente e úmido*. 2001. 148p. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, da Universidade de São Paulo -USP, São Paulo, 2001.

CHARNET, R. Análise de modelos de regressão linear com aplicações. Campinas: Ed. Da Unicamp, 1999.

CHVATAL, K. M. S. *A prática do projeto arquitetônico em Campinas, SP e diretrizes para o projeto de edificações Adequadas ao clima*. 1998. 173 fls.Dissertação de Mestrado

– Faculdade de Engenharia Civil - FEC, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, Campinas, 1998.

CLEMENTS, J. A; SHERIF, S. A. Thermal analysis of roof-spray cooling. *International Journal of Energy Research*, n. 22, p. 1337-1350, 1998.

COOK, J. Passive Cooling. Cambridge: The Mit Press, 3rd printing, 2002.

EUMORFOPOULOU, E; ARAVANTINOS, D. The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece. *Energy and Buildings*, n.27, p.29-36, 1998.

EVANS, J. M.; SCHILLER, S. Diseño bioambiental y arquitectura solar. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 1991.

FANGER, O. Thermal Comfort – Analysis and Application in Environmental Engineering. McGraw-Hill, New York, 1970.

GHIABAKLOU, Z. Thermal comfort prediction for a new passive cooling system. *Building And environment*, n.38, p.883-891, 2003.

GHOSAL, M. K; TIWARI, G. N; SRIVASTAVA, N. S. L. Modeling and experimental validation of a greenhouse with evaporative cooling by moving water film over external shade cloth. *Energy and Buildings*, n. 35, p. 843-850, 2003.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. São Paulo: Atlas, 4^a ed., 2002.

GIVONI, B. *Arquitetura bioclimática e conforto e emprego de medidas passivas na arquitetura*. Anotações de aula, manuscrito do curso ministrado por B. Givoni. Curitiba, promovido pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET-PR, de 7 a 10 de abril de 2003a.

_____. *Climate considerations in building and urban design*. New York: John Wiley & Sons, 1997a.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. ***Energy and Buildings***, n.18, July, 1992.

_____. Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures. *Part I: 1993 experimental periods*. ***Renewable Energy***, v.10, n.2/3, p.179-183, 1997b.

_____. Experimental performance of the cooling shower tower in Japan. ***Energy and Buildings***, n.28, p.25-32, 1998.

_____; YAJIMA, S. Experimental performance of the cooling shower tower in Japan. ***Renewable Energy***, v.10, n.2/3, p. 179-183, 1997.

_____. ***Man , climate and architecture***. London: Applied Science Pub, 1994a.

_____; NOGUCHI, M.; SAARONI, H.; POCHTER, O.; YAACOV, Y.; FELLER, N.; BECKER, S. Outdoor comfort research issues. ***Energy and Building***, n.35, p.77-86, 2003b.

_____. Performance of the shower cooling tower in different climates. ***Renewable Energy***, v.10, n.2/3, p. 173-178, 1997c.

_____. ***Passive and low energy cooling of buildings***. New York: Van Nostrand Reinhold, 1994b.

KANT, K; MULLICK, S. C. Thermal comfort in a room with exposed roof using evaporative cooling in Delhi. ***Building and Environment***, vol. 38, n.1, p.185-193, 2003.

KONDEPUDI, S.N. A simplified analytical method to evaluate the effects of rrof spray evaporative cooling.. ***Energy Conversion and Management***, n. 1, vol. 34, p. 7-16, 1993.

MANZAN, M.; SARO, O. Numerical analysis of heat and mass transfer in a passive building component cooled by water evaporation. ***Energy and Buildings***, n. 34, p. 369-375, 2002.

MOREIRA, J. dos S. Elementos de Estatística. São Paulo: Atlas, 9ª ed., 1982.

MORETTIN, L.G. Estatística Básica. São Paulo: Makron Books, 7ª ed., vol.1, 1999.

NACIONES UNIDAS. Departamento de Assuntos Económicos y Sociales. El clima y el diseño de casas. Nueva York: Naciones Unidas, 1973. (Diseño de Viviendas Económicas y Servicios de la Comunidad, 1).

NAHAR, N. M.; SHARMA, P.; PUROHIT, M. M. Studies on solar passive cooling techniques for arid areas. *Energy Conversion and Management*, n. 40, p. 89-95, 1999.

_____.; _____.; _____. Studies on solar passive cooling techniques for arid areas. *Energy and Buildings*, n. 35, p. 153-159, 2003.

NASCIMENTO, G. R.; RORIZ, M. Refrigeração evaporativa de telhado cerâmico por meio de gotejamento de água. *In: VIII ENCAC e IV ELACAC 2005 - Encontro Nacional e Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído*. Anais em CD. Maceió: Antac, 2005.

OLGYAY, V. *Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Título original: Design with Climate, 1963. Barcelona: Gustavo Gili, 2002. .

PRADO, R. T. A.; FERREIRA, F. L. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, n. 37, p.295-300, 2005.

RAJAPAKSHA, A.; NAGAI, H.; OKUMYIA, M. A Ventilated courtyard as a passive cooling strategy in the warm humid tropics. *Renewable Energy*, n.28, p.1775-1778, 2003.

RIVERO, R. *Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural*. Porto Alegre: D. C. Luzzatto editores, 1986.

ROMERO, M. A. B. *Princípios bioclimáticos para o desenho urbano*. São Paulo: P.W., 1988.

RORIZ, M. *Psicrom 1.0 – Relações psicométricas*. São Carlos: UFSCAR, 2003.

RORIZ, M. **ZBBR 1.1: Classificação bioclimática das sedes dos municípios brasileiros, conforme ABNT**. São Carlos: UFSCAR, 2004.

RORIZ, V. F.; RORIZ, M. Sistemas evaporativos de resfriamento de coberturas: estudo de casos em São Carlos, Sp, Brasil. *In: VIII ENCAC e IV ELACAC 2005 - Encontro Nacional e Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído*. Anais em CD. Maceió: Antac, 2005.

ROSENFELD, A. H.; AKBARI, H.; BRETZ, S.; FISHMAN, L.; KURN, D. M.; SAILOR, D.; TAHA, H. Mitigation of urban heat island: materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings*, n. 22, p. 255-265, 1995.

_____.; _____.; ROMM, J. J.; POMERANTZ, M. Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energy and Buildings*, n. 28, p. 51-62, 1998.

RUAS, A. C. *Sistematização da avaliação de conforto térmico em ambientes edificados e sua aplicação num software*. 2002. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Civil – FEC. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 2002. Disponível em : <http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000283945>.

SILVA, A. C. S. B. da; CUNHA NETO, J. A. B. da; LAMBERTS, R. Modelo de simulação de desempenho térmico de edificações condicionadas com microaspersão d'água. *In: VIII ENCAC e IV ELACAC 2005 - Encontro Nacional e Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído*. Anais em CD. Maceió: Antac, 2005.

TANG, R; ETZION, Y. Cooling performance of roof ponds with gunny bags floating on water surface as compared with a movable insulation. *Renewable Energy*, n. 30, p. 1373-1385, 2005.

_____.; _____. On thermal performance of an improved roof for cooling buildings. *Building and Environment*, n. 39, p. 201-209, 2004.

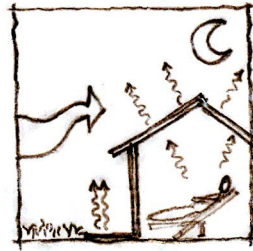
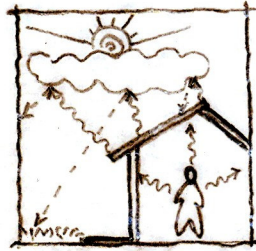
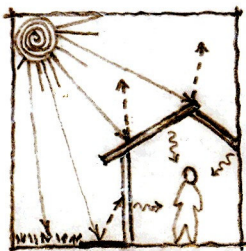
_____.; _____.; ERELL, E. Experimental studies on a novel roof pond configuration for the cooling of buildings. *Renewable Energy*, n. 28, p. 1513-1522, 2003.

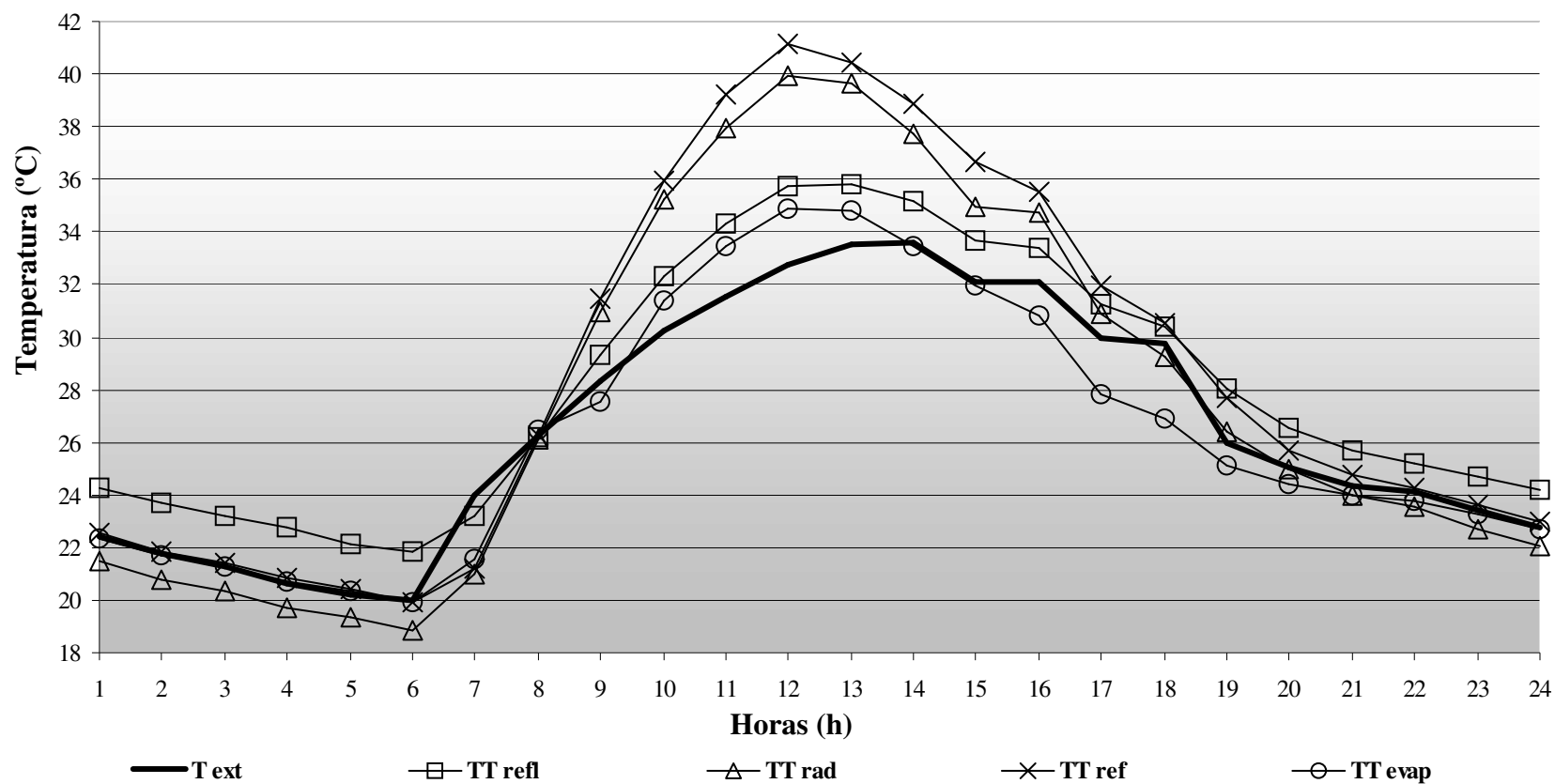
TANG, R; ETZION, Y; MEIR, I. A. Estimates of clear night sky emissivity in the Negev Highlands, Israel. *Energy Conversion and Management*, n. 45, p. 1831-1843, 2004.

WAEWSAK, J; HIRUNLABH, J; KHEDARI, J; SHIN, U.C. Performance evaluation of the BSRC multi-purpose bio-climatic roof. *Building and Environment*, n 38, p. 1297-1302, 2003.

WONG, N.H.; CHEN, Y.; ONG, C. L.; SIA, A. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment*, n.38, p.261-270, 2003.

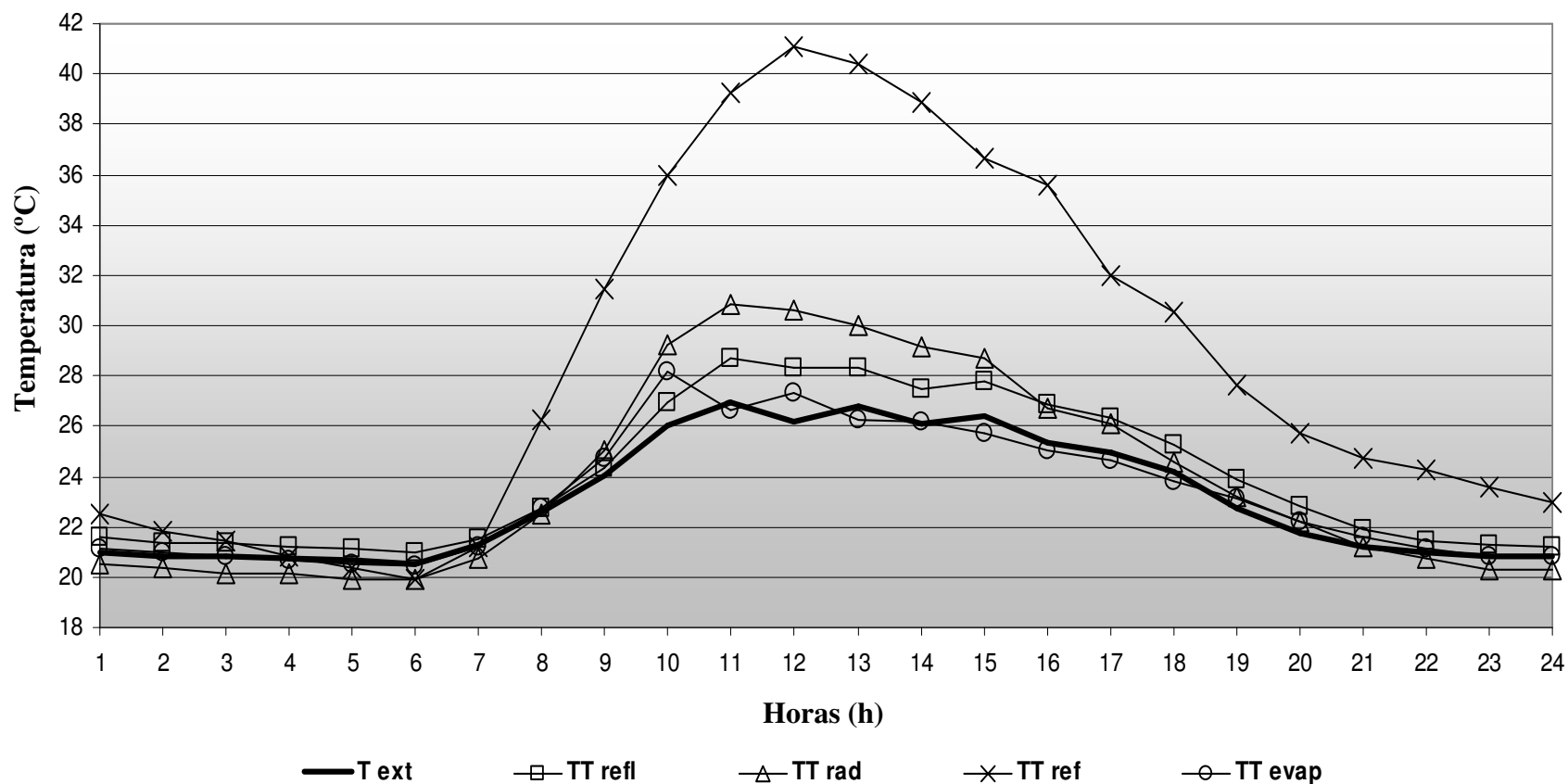
ANEXOS





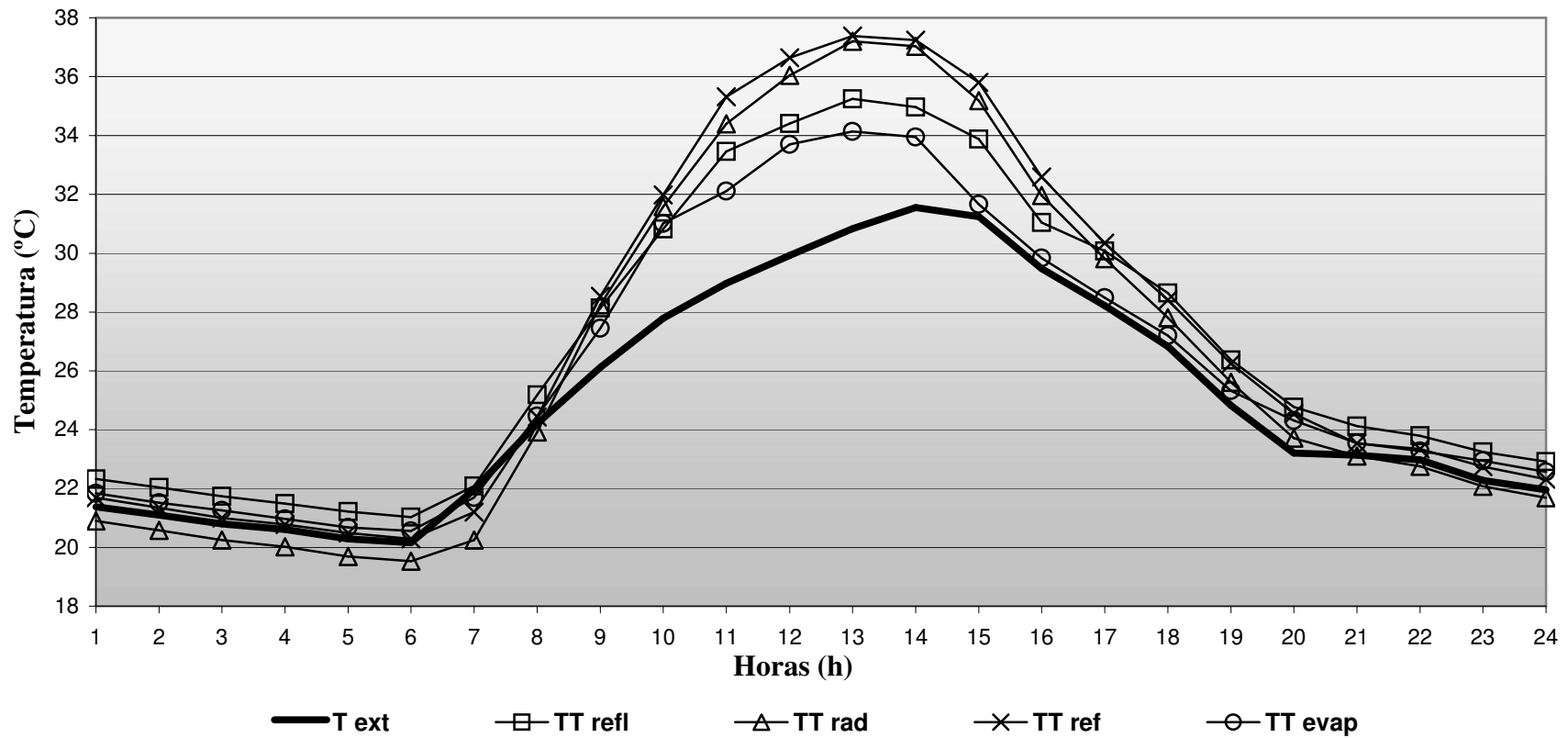
ANEXO A - Médias Horárias de TT no período de 21 a 25/jan/2006

Onde: T ext – temperatura do ar externa; TTrad – temperatura da superfície interna da telha com sistema radiante; TTreflex – temperatura da superfície interna da telha com sistema reflexivo; TTref - temperatura da superfície interna da telha de referência; TTevap – temperatura da superfície interna da telha com sistema evaporativo. Ciclo de aspersão de 30 min com intervalo de 30 min.



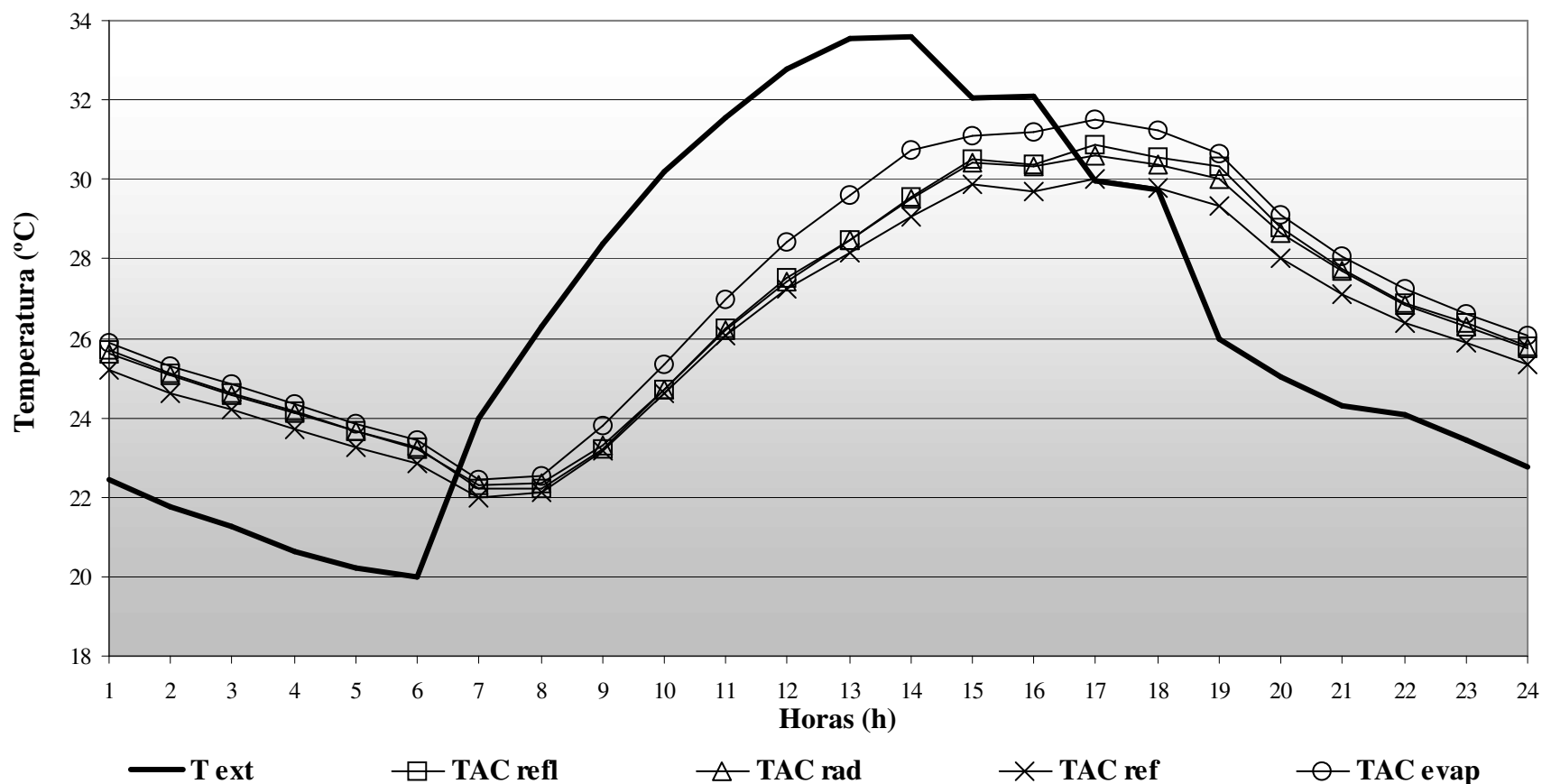
ANEXO B - Médias Horárias de TT no período de 26 a 30/jan/2006

Onde: T ext – temperatura do ar externa; TT rad – temperatura da superfície interna da telha com sistema radiante; TTreflex – temperatura da superfície interna da telha com sistema reflexivo; TTref – temperatura da superfície interna da telha de referência; TTevap – temperatura da superfície interna da telha com sistema evaporativo. Ciclo de aspersão contínuo.



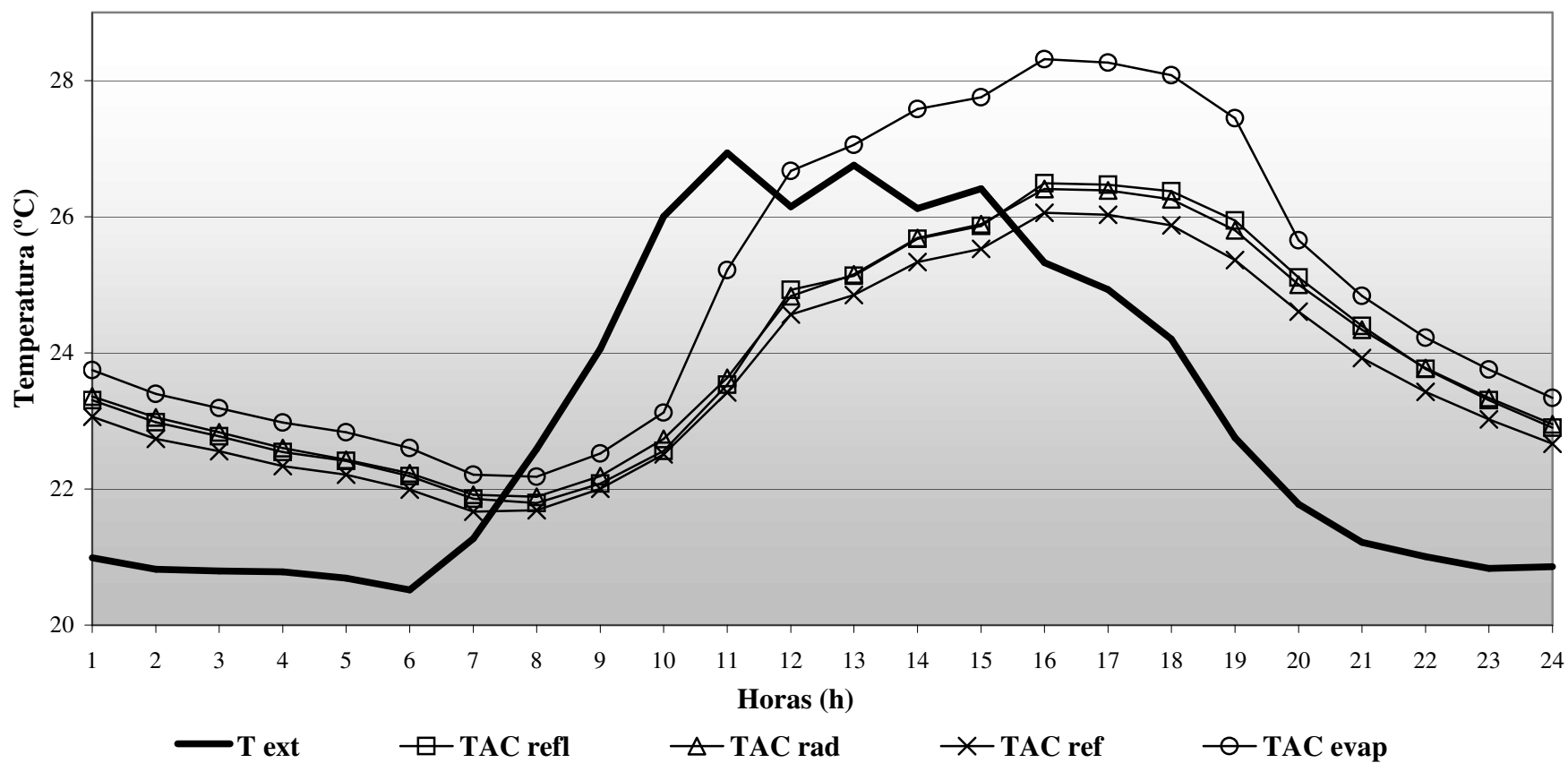
ANEXO C- Médias horárias de TT no período de 31/jan a 9/fev/2006

Onde: T ext – temperatura do ar externa; TTreflex – temperatura da superfície interna da telha com sistema reflexivo; TTrad – temperatura da superfície interna da telha com sistema radiante; TTref - temperatura da superfície interna da telha de referência; TTevap – temperatura da superfície interna da telha com sistema evaporativo. Ciclo de aspersão de 30 min com intervalo de 1h e 30 min.



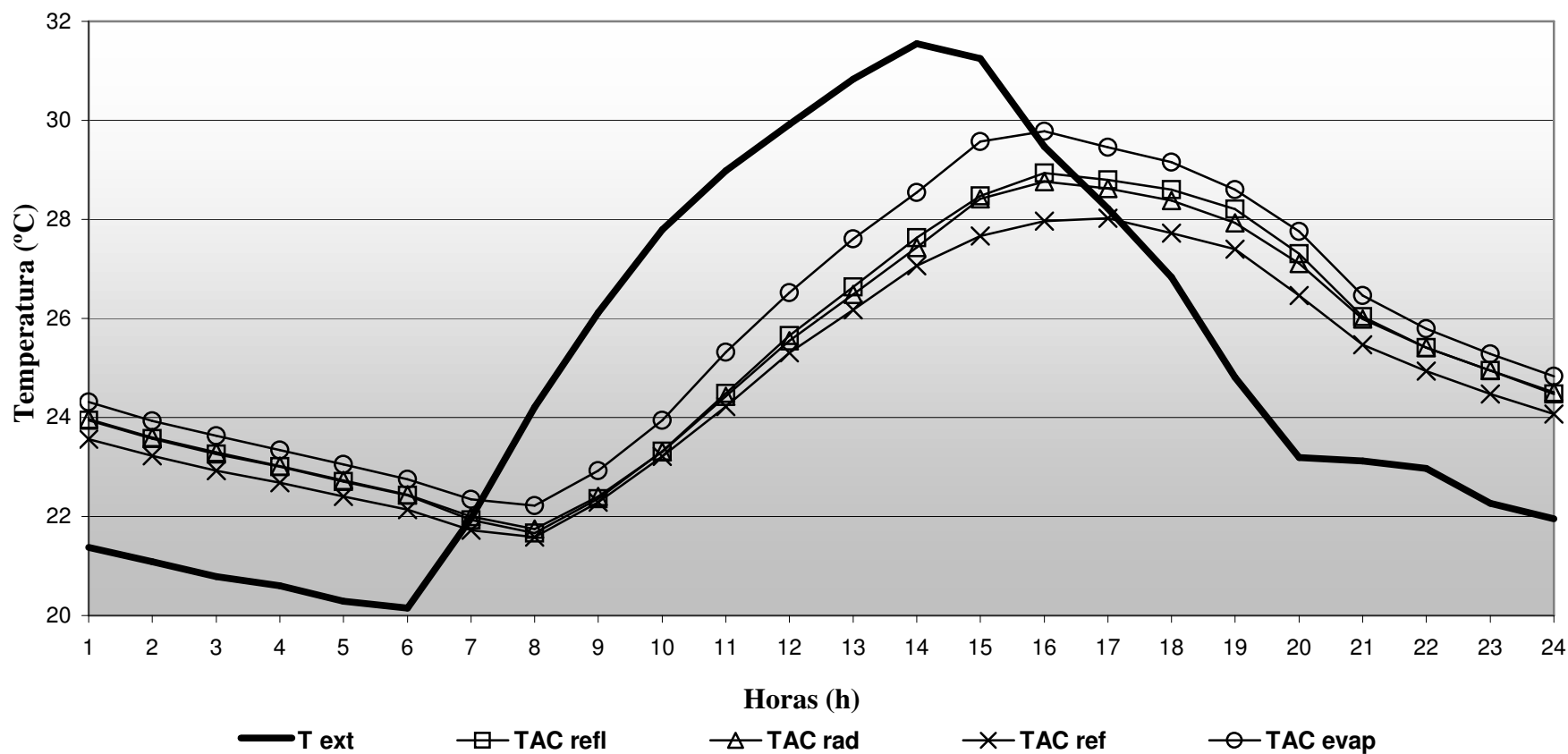
ANEXO D - Médias horárias de TAA no período 21 a 25/jan/2006

Onde: T ext – temperatura do ar externa; TTreflex – temperatura da superfície interna da telha com sistema reflexivo; TTrad – temperatura da superfície interna da telha com sistema radiante; TTref – temperatura da superfície interna da telha de referência; TTevap – temperatura da superfície interna da telha com sistema evaporativo. Ciclo de aspersão de 30min e intervalo de 30 min.



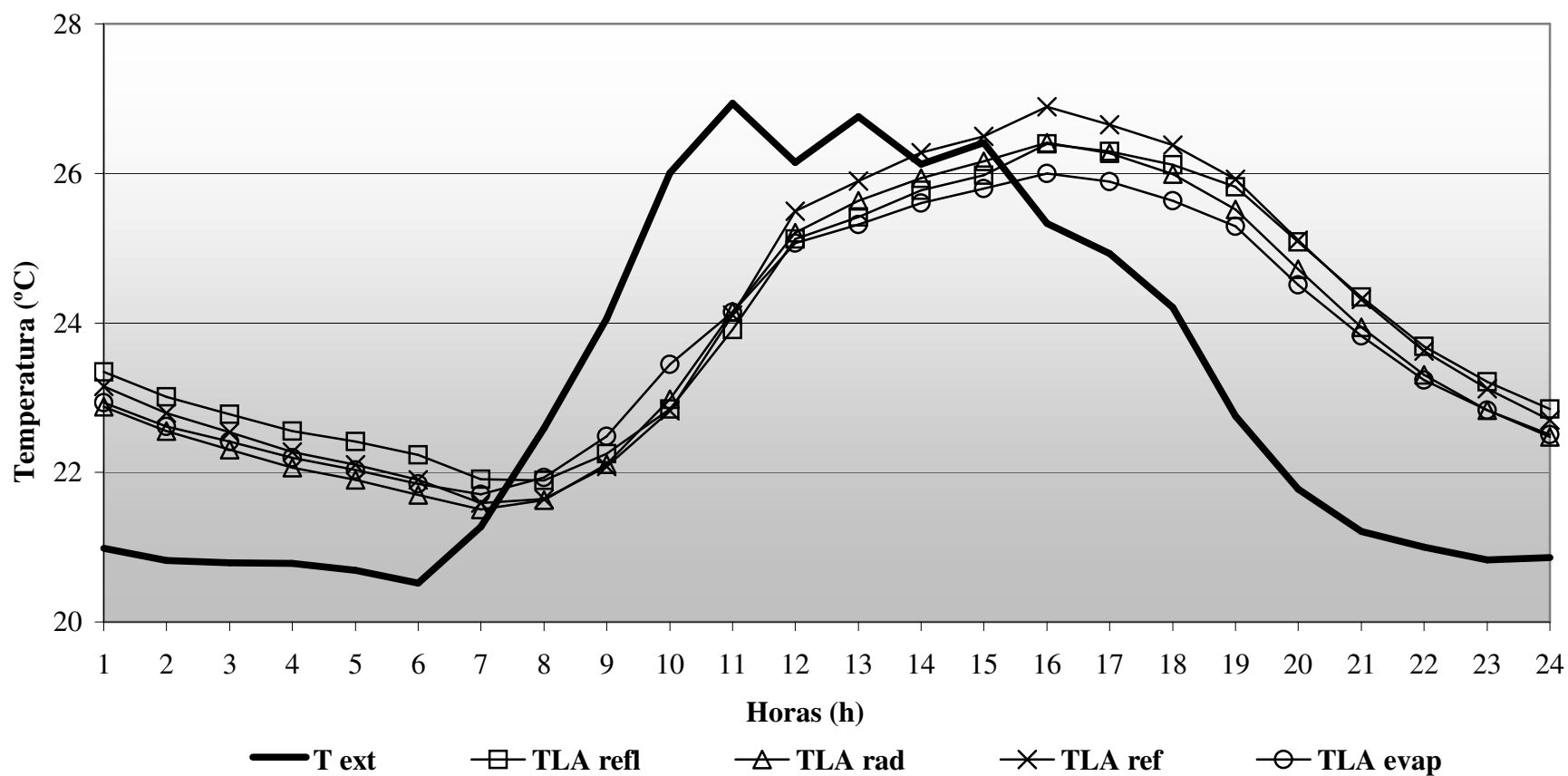
ANEXO E - Médias horárias de TAA no período de 26 a 30/jan/2006

Onde: T ext – temperatura do ar externa; TTreflex – temperatura da superfície interna da telha com sistema reflexivo; TTrad – temperatura da superfície interna da telha com sistema radiante; TTref – temperatura da superfície interna da telha de referência; TTevap – temperatura da superfície interna da telha com sistema evaporativo. Ciclo de aspersão contínuo.



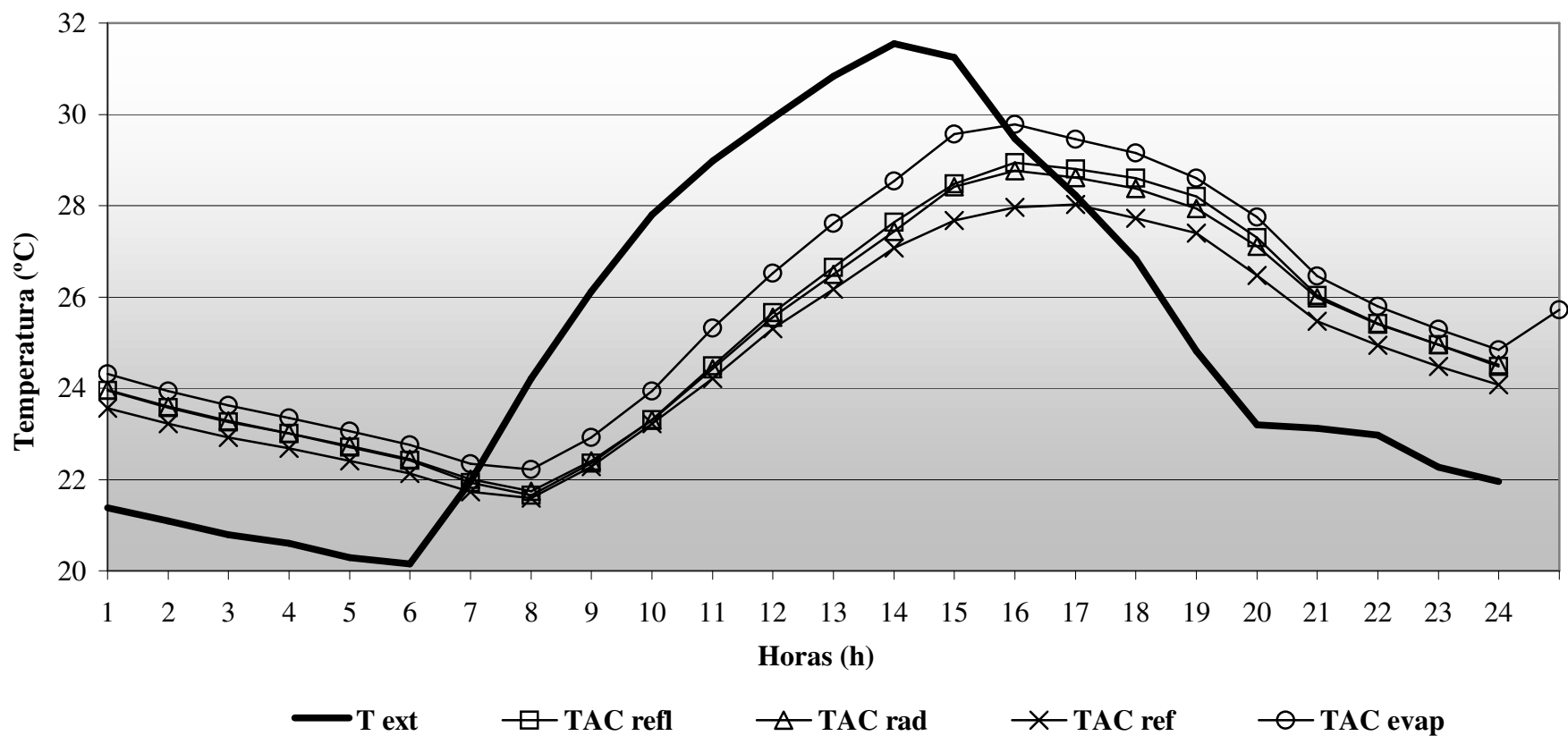
ANEXO F- Médias Horárias de TAA no período de 31/jan a 9/fev/2006

Onde: T ext – temperatura do ar externa; T Treflex – temperatura da superfície interna da telha com sistema reflexivo; T Ttrad – temperatura da superfície interna da telha com sistema radiante; T Tref – temperatura da superfície interna da telha de referência; T Tevap – temperatura da superfície interna da telha com sistema evaporativo. Ciclo de aspersão de 30min e intervalo de 1h e 30 min



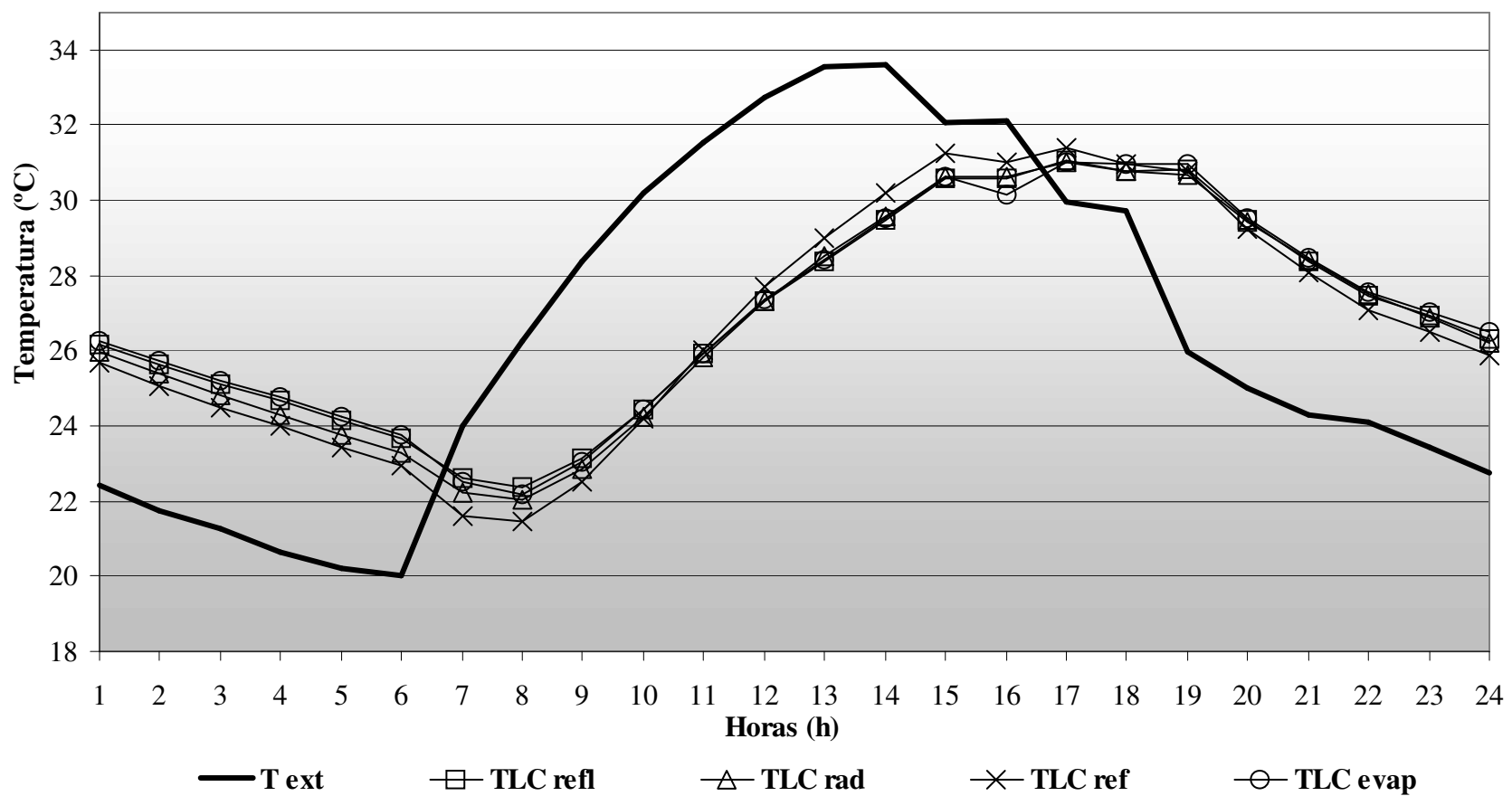
ANEXO G - Médias horárias de TLA no período de 21 a 25/jan/2006

Onde: T ext – temperatura do ar externa; T Treflex – temperatura da superfície interna da telha com sistema reflexivo; T Trad – temperatura da superfície interna da telha com sistema radiante; T Tref – temperatura da superfície interna da telha de referência; T Tevap – temperatura da superfície interna da telha com sistema evaporativo. Ciclo de aspersão de 30min e intervalo de 30 min.



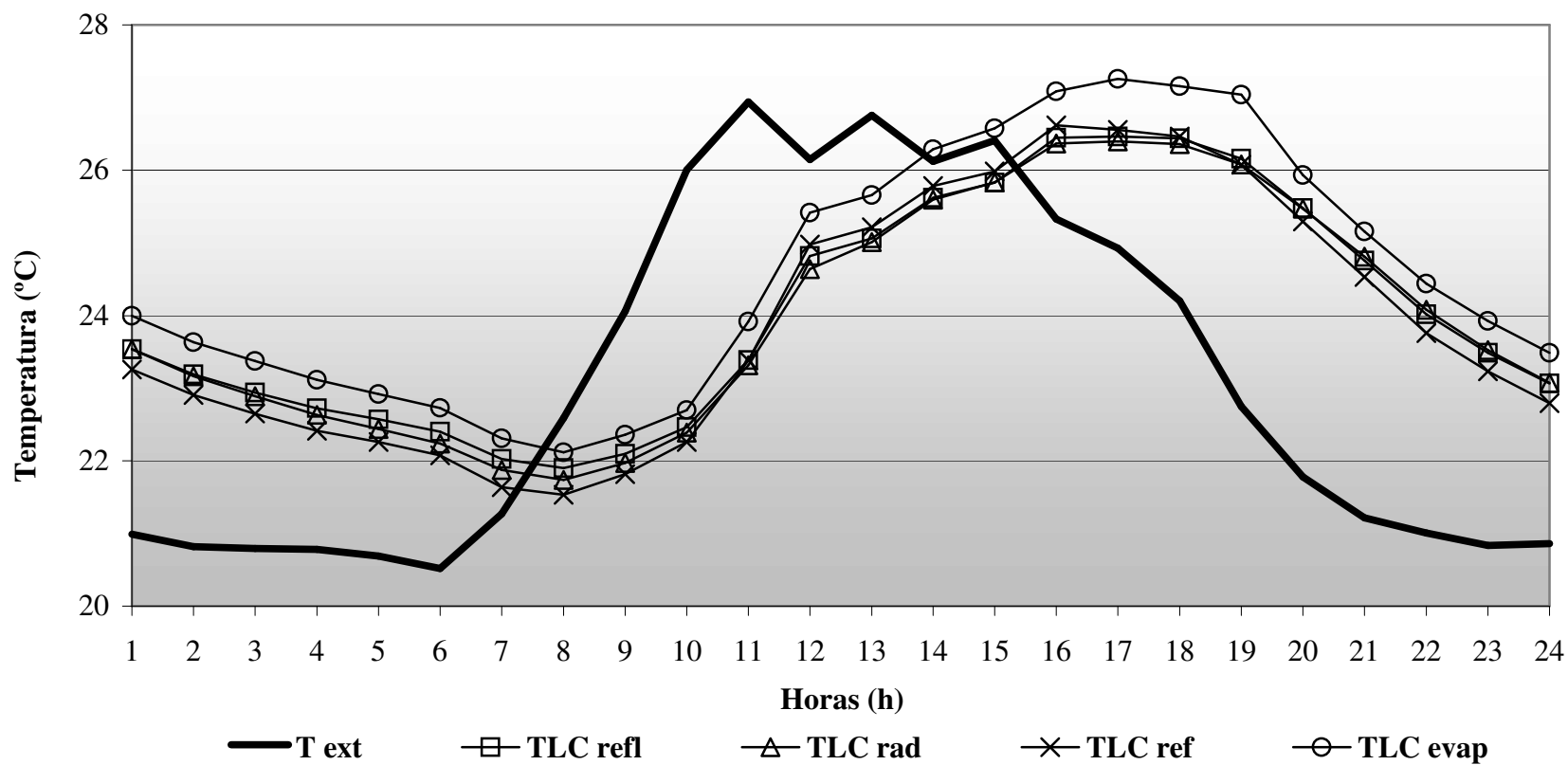
ANEXO H - Médias horárias de TLA no período de 26 a 30/jan/2006

Onde: T ext – temperatura do ar externa; TTreflex – temperatura da superfície interna da telha com sistema reflexivo; TTrad – temperatura da superfície interna da telha com sistema radiante; TTref – temperatura da superfície interna da telha de referência; TTevap – temperatura da superfície interna da telha com sistema evaporativo. Ciclo de aspersão contínuo.



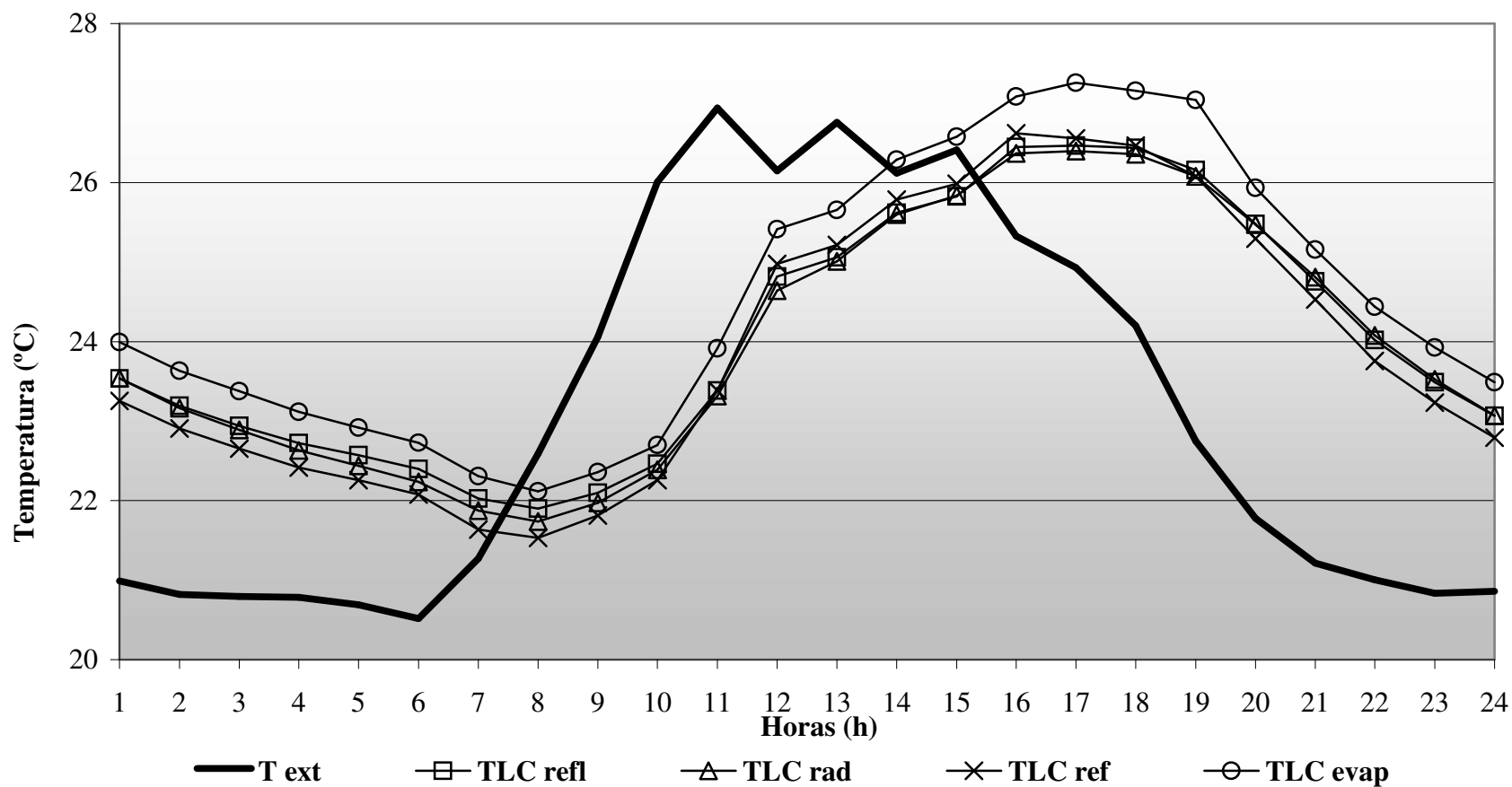
ANEXO I - Médias horárias de TLA no período de 31/jan a 9/fev/2006

Onde: T ext – temperatura do ar externa; TTreflex – temperatura da superfície interna da telha com sistema reflexivo; TTrad – temperatura da superfície interna da telha com sistema radiante; TTref – temperatura da superfície interna da telha de referência; TTevap – temperatura da superfície interna da telha com sistema evaporativo. Ciclo de aspersão de 30min e intervalo de 1h e 30 min.



ANEXO J - Médias horárias de TLC no período de 21 a 25/jan/2006

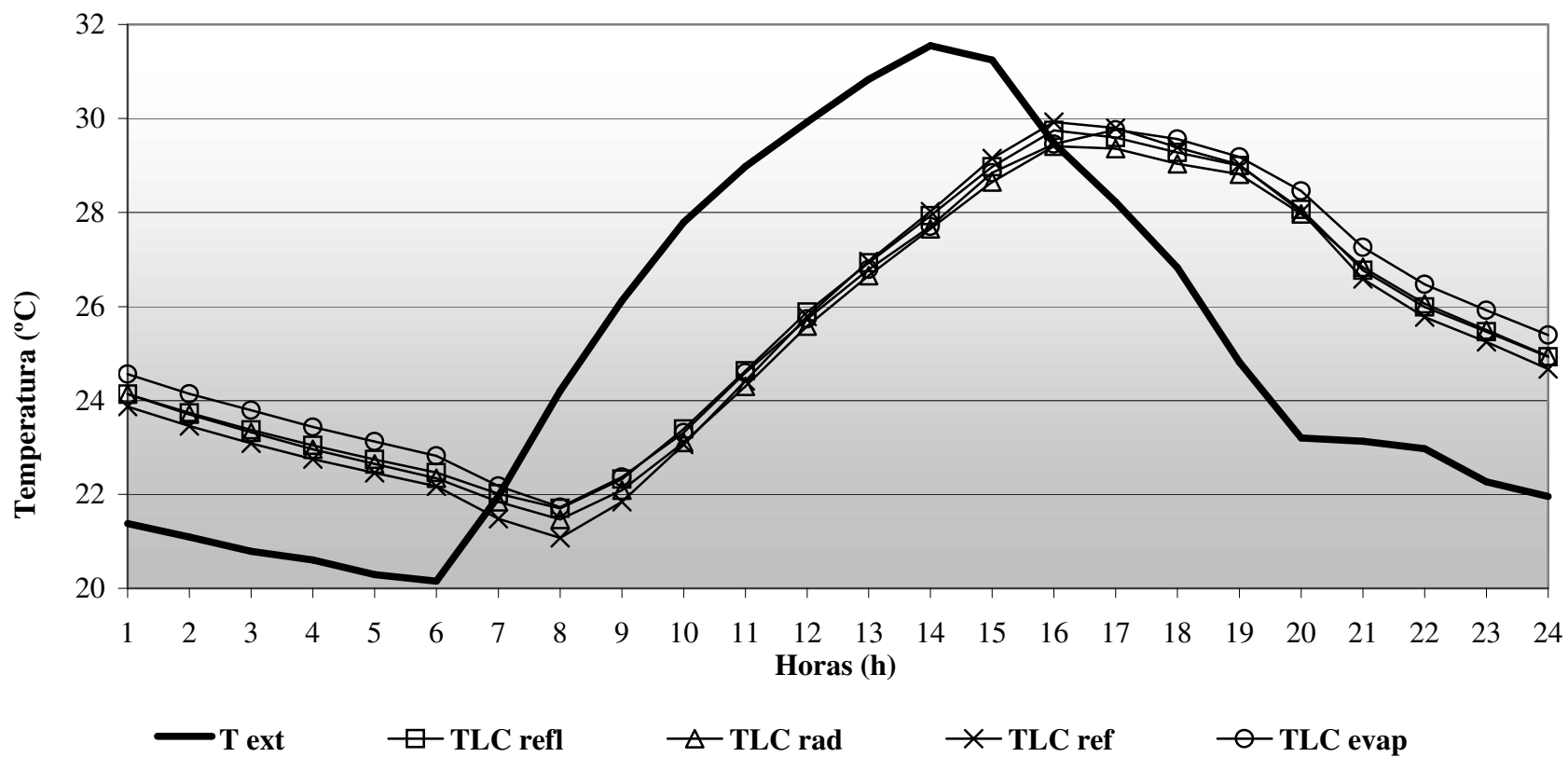
Onde: T ext – temperatura do ar externa; TTreflex – temperatura da superfície interna da telha com sistema reflexivo; TTrad – temperatura da superfície interna da telha com sistema radiante; TTref – temperatura da superfície interna da telha de referência; TTevap – temperatura da superfície interna da telha com sistema evaporativo. Ciclo de aspersão de 30min e intervalo de 30 min.



ANEXO K - Médias horárias de TLC no período de 26 a 30/jan/2006

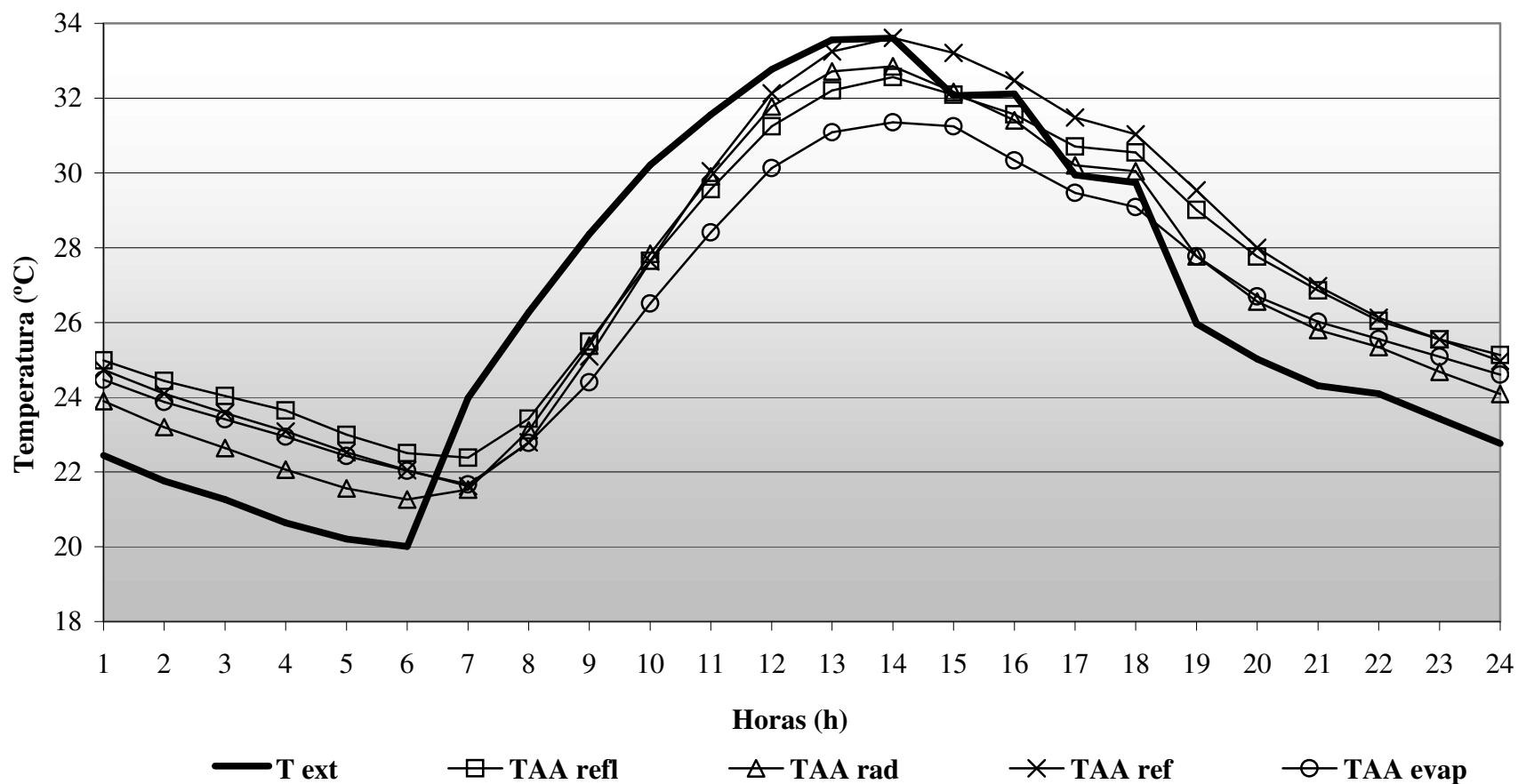
Onde: T ext – temperatura do ar externa; T Treflex – temperatura da superfície interna da telha com sistema reflexivo; T Ttrad – temperatura da superfície interna da telha com sistema radiante; T Tref – temperatura da superfície interna da telha de referência; T Tevap – temperatura da superfície interna da telha com sistema evaporativo. Ciclo de aspersão direta.

..



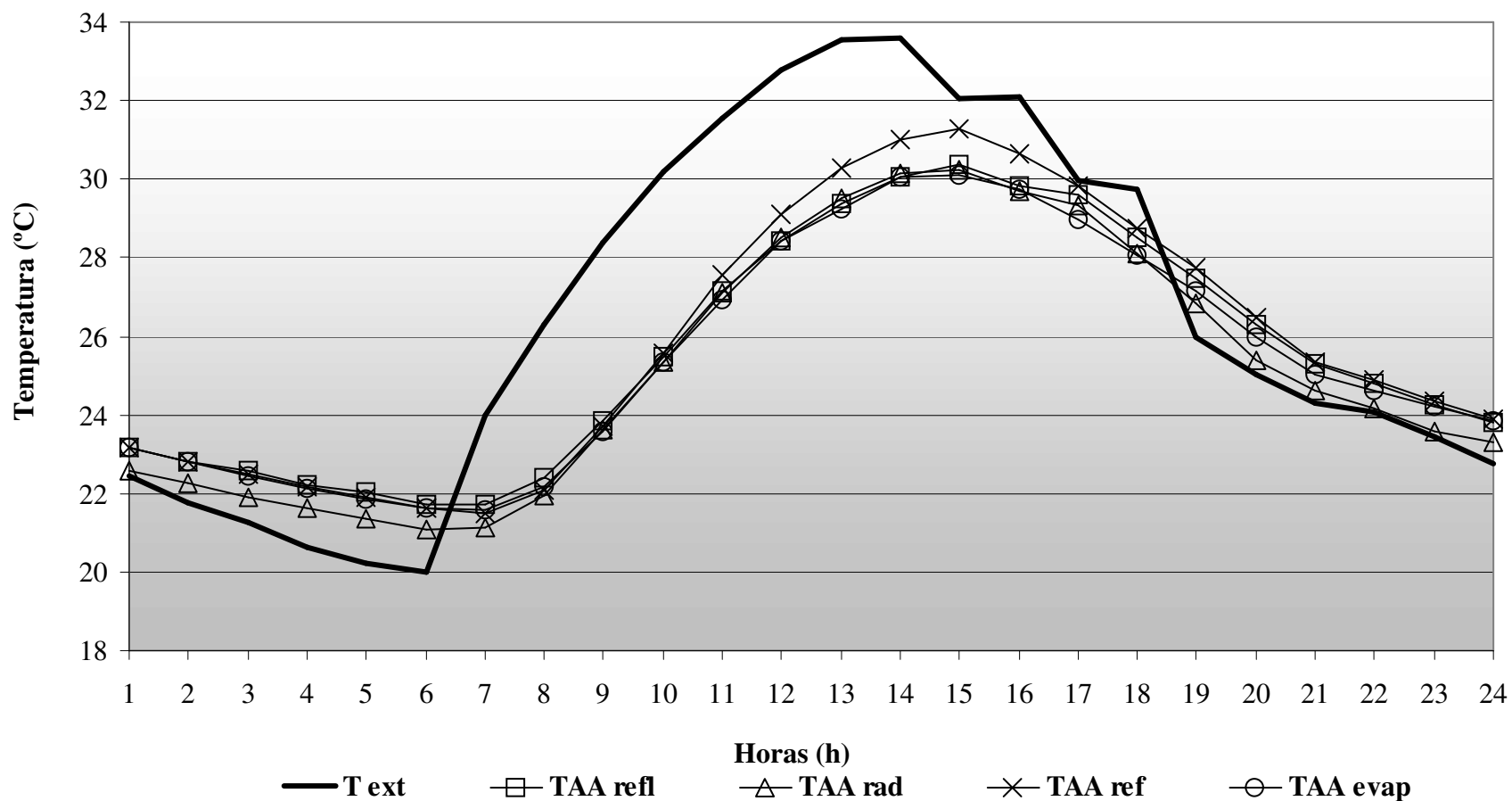
ANEXO L - Médias horárias de TLC no período de 31/jan a 9/fev/2006

Onde: Text Text – temperatura do ar externa; TTreflex – temperatura da superfície interna da telha com sistema reflexivo; TTrad – temperatura da superfície interna da telha com sistema radiante; TTref – temperatura da superfície interna da telha de referência; TEvap – temperatura da superfície interna da telha com sistema evaporativo. Ciclo de aspersão de 30min e intervalo de 1h e 30 min.



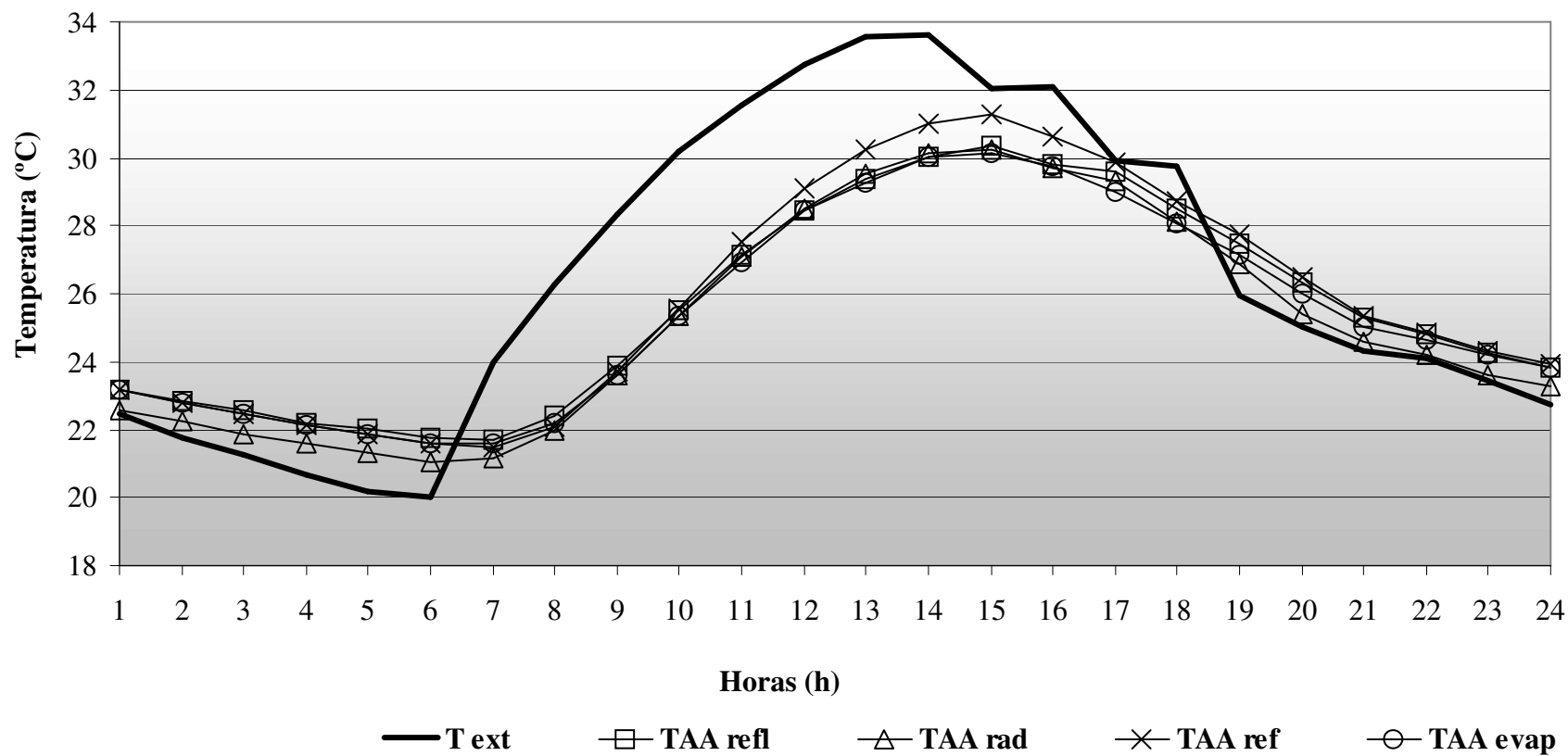
ANEXO M - Médias horárias de TAC no período de 20 a 25/jan/2006

Onde: T ext – temperatura do ar externa; TTreflex – temperatura da superfície interna da telha com sistema reflexivo; TTrad – temperatura da superfície interna da telha com sistema radiante; TTref – temperatura da superfície interna da telha de referência; TTevap – temperatura da superfície interna da telha com sistema evaporativo. Ciclo de aspersão de 30min e intervalo de 30 min.



ANEXO N - Médias horárias de TACno período de 26 a 31/jan/2006

Onde: Text – temperatura do ar externa; TTreflex – temperatura da superfície interna da telha com sistema reflexivo; TTrad – temperatura da superfície interna da telha com sistema radiante; TTref – temperatura da superfície interna da telha de referência; TTevap – temperatura da superfície interna da telha com sistema evaporativo. Ciclo de aspersão direta.



ANEXO O - Médias horárias de TAC no período de 31/jan a 9/fev/2006

Onde: T ext – temperatura do ar externa; TTreflex – temperatura da superfície interna da telha com sistema reflexivo; TTrad – temperatura da superfície interna da telha com sistema radiante; TTref – temperatura da superfície interna da telha de referência; TTevap – temperatura da superfície interna da telha com sistema evaporativo. Ciclo de aspersão de 30min e intervalo de 1h e 30 min.